INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA
Diciembre 2022 · nº 555 · 6,50 €
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

CARRERA COMERCIAL A LA LUNA

Varias empresas privadas se disponen a aterrizar en nuestro satélite

EVOLUCIÓN

Mareas tóxicas de algas y bacterias

FÍSICA

En el corazón de la teoría cuántica de campos

MEDICINA

Curar astronautas en plena misión

SUMARIO

ARTÍCULOS

SECCIONES

ILUSTRACIÓN DE PORTADA: NASA

APUNTES



NURPHOTO/GETTY IMAGES

Los relámpagos no suelen caer sobre el océano.

CLIMA

RELÁMPAGOS OCEÁNICOS

El aerosol marino podría inhibir la descarga de rayos

A pesar de que la mayor parte de la lluvia cae sobre los océanos, los relámpagos en el mar son extrañamente infrecuentes, y los científicos llevan decenios intentando descubrir el motivo. Ahora, un estudio sugiere que las partículas de sal marina suspendidas en el aire podrían interferir en el proceso de ionización de las nubes.

Las gruesas nubes que se forman durante las tormentas pueden electrificarse cuando el aire ascendente las vuelve tan altas como para que las capas superiores se congelen. Eso genera una mezcla de granos de nieve redondeados (a veces llamados «graupel») y cristales de hielo microscópicos. Cuando esas partículas de nieve y hielo chocan entre sí, se transfieren cargas eléctricas: los granos de nieve, de mayor tamaño, tienden a cargarse negativamente, mientras que los cristales de hielo adquieren carga positiva.

Esos cristales de hielo cargados son tan ligeros que las corrientes de aire ascendente los transportan a lo alto de la nube, mientras que los granos de nieve tienden a hundirse. Con el tiempo, esta separación de cargas genera un campo eléctrico vertical. Y cuando la diferencia de potencial entre las partes superior e inferior de la nube, o entre la nube y el suelo, aumenta lo suficiente, se produce un relámpago.

Sin embargo, si existen grandes partículas de sal capaces de absorber agua (las cuales abundan en el aire oceánico), las pequeñas gotas que, en condiciones normales, se condensan en el polvo y el hollín microscópicos para formar las nubes crecen mucho más deprisa. Así, se tornan tan pesadas que caen en forma de lluvia mucho antes de que la nube crezca lo bastante para cargarse eléctricamente. Aunque este mecanismo de atenuación de los rayos ya se había propuesto antes, aún no se habían hallado indicios que lo confirmaran en las observaciones meteorológicas globales.

A fin de buscarlos, un equipo de investigadores de China, Israel y Estados Unidos recopiló mediciones globales de nubes y descargas de rayos, junto con las distribuciones esperadas de partículas de polvo, sal o agentes contaminantes en la atmósfera. Utilizaron esos registros para examinar la evolución temporal de los sistemas nubosos en presencia de distintas combinaciones de partículas, documentando cuándo se producían precipitaciones y relámpagos. El equipo descubrió que en las zonas con sal suspendida con niebla salina se observaban hasta un 90 por ciento menos de rayos.

«Logramos separar los efectos de las partículas grandes [de sal] y pequeñas», señala Daniel Rosenfeld, científico atmosférico de la Universidad Hebrea de Jerusalén y coautor del artículo, publicado en *Nature Communications*. Los climatólogos a menudo ignoran estos efectos a la hora de pronosticar cuándo y dónde lloverá, añade. «Si no se incluyen en los modelos de predicción meteorológica, y sobre todo en los de predicción climática, no se obtiene una imagen correcta ni se acierta con las precipitaciones», sentencia Rosenfeld.

No obstante, las partículas en suspensión, conocidas como aerosoles, no son el único factor que actúa en el complejo interior de las nubes. Otras diferencias atmosféricas causadas por las condiciones meteorológicas locales, como el viento y la temperatura, también podrían influir en la frecuencia con la que caen los relámpagos, tanto en la tierra como en el mar. «Separar el efecto de los aerosoles [del de esas otras variables meteorológicas] a partir de un mero análisis observacional supone todo un reto», comenta Jiwen Fan, geocientífica que estudia las interacciones entre los aerosoles, las nubes, las precipitaciones y el clima en el Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico.

Fan, que no participó en el estudio, aboga por desarrollar modelos informáticos detallados de los procesos acaecidos en el interior de las nubes de tormenta. Según ella, eso daría más pistas sobre la importancia de los aerosoles de sal marina a la hora de determinar cuándo y dónde pueden producirse descargas de rayos.

Sasha Warren

EVOLUCIÓN

ESCAMAS DENTÍFERAS

Los fósiles de los peces sierra ayudan a explicar el remoto origen de los dientes

Seguro que uno no se ve a sí mismo como un animal cubierto de escamas, pero las formaciones duras que alberga nuestra boca podrían contar otra historia. Un novedoso estudio centrado en uno de los animales más extraños del mundo, el pez sierra, avala la idea de que los dientes surgieron por primera vez cuando las escamas corporales de ciertos peces primitivos se desplazaron hasta el interior de la cavidad bucal hace unos 400 millones de años.

Aquellos dientes dotaron a los peces con mandíbula de una gran ventaja evolutiva. «A la hora de comer, si no se succiona algo tan pequeño como el plancton, el poder sujetar el alimento con la boca supone una ventaja indudable», afirma Per Ahlberg, paleontólogo de la Universidad de Uppsala, que no ha participado en el nuevo estudio. La capacidad de morder significó un gran paso adelante; Ahlberg puntualiza que la masticación vendría después. Todos los animales dentados actuales, desde la trucha hasta el ser humano pasando por el cocodrilo, son al parecer descendientes de un único grupo de peces mandibulados, asegura Yara Haridy, paleontóloga de la Universidad de Chicago, que tampoco ha participado en la investigación.

Los expertos mantienen opiniones encontradas sobre el origen de los dientes. Una de las hipótesis, conocida como «de fuera adentro», sostiene que las escamas corporales protectoras duras, formadas por tejido mineralizado (como la dentina o el esmalte) habrían migrado a la boca. Según otra hipótesis, denominada «de dentro afuera», habrían brotado del interior, del mismo tejido del que derivan las branquias. El nuevo estudio del pez sierra, publicado en el *Journal of Anatomy*, ofrece nuevas pistas favorables al origen externo.

Los autores recopilaron ejemplares fósiles de una especie extinta de pez sierra, *Ischyrhiza mira*, de unos 70 millones de antigüedad. De cada especimen analizaron los dentículos rostrales, unas púas que sobresalían a los lados del largo rostro de las que se servían para buscar alimento y como defensa. Aunque semejan dientes, en realidad son escamas corporales especializadas.

A diferencia de los estudios anteriores llevados a cabo con peces sierra actuales y prehistóricos, en este se ha examinado la estructura interna de la dura capa externa de las escamas, llamada esmaltoide. «En esencia es la forma primitiva del esmalte [dental]», explica Haridy.

Cuando los investigadores rasparon las capas externas de las escamas con papel de lija y ácido y las observaron con un microscopio electrónico de barrido, quedaron sorprendidos por el grado de complejidad que afloró.

Todd Cook, paleontólogo de la Universidad Estatal de Pensilvania y autor principal del estudio, explica que esperaban hallar una estructura homogénea parecida a la de muchas otras escamas corporales. En lugar de eso, contemplaron unas regiones distintivas de microcristales que resisten las tensiones mecánicas. «De hecho, la organización general del esmaltoide recordaba a la de un diente de tiburón actual», explica Cook.

Si bien los dentículos rostrales no se convirtieron en dientes, pues los antepasados de los peces sierra ya eran dentados, este descubrimiento indica que escamas como las de la superficie del pez se habrían transformado en una estructura interna dentiforme, algo que podría haber sucedido por lo menos una vez. Cook añade que es menos probable que una estructura similar hubiese surgido de forma independiente a partir del tejido interno de la garganta, cuya naturaleza es muy distinta.

«Este hallazgo respalda la hipótesis de fuera adentro», opina Ann Huysseune, bióloga evolutiva del desarrollo en la Universidad de Gante, ajena al estudio. «Pero no me sorprende; es uno de los muchos argumentos que existen a su favor.»

Ahlberg destaca que el tejido externo que forma las escamas del pez se encuentra con el tejido interno en algún lugar cercano a la boca. Pero el límite exacto entre ambos resulta difícil de

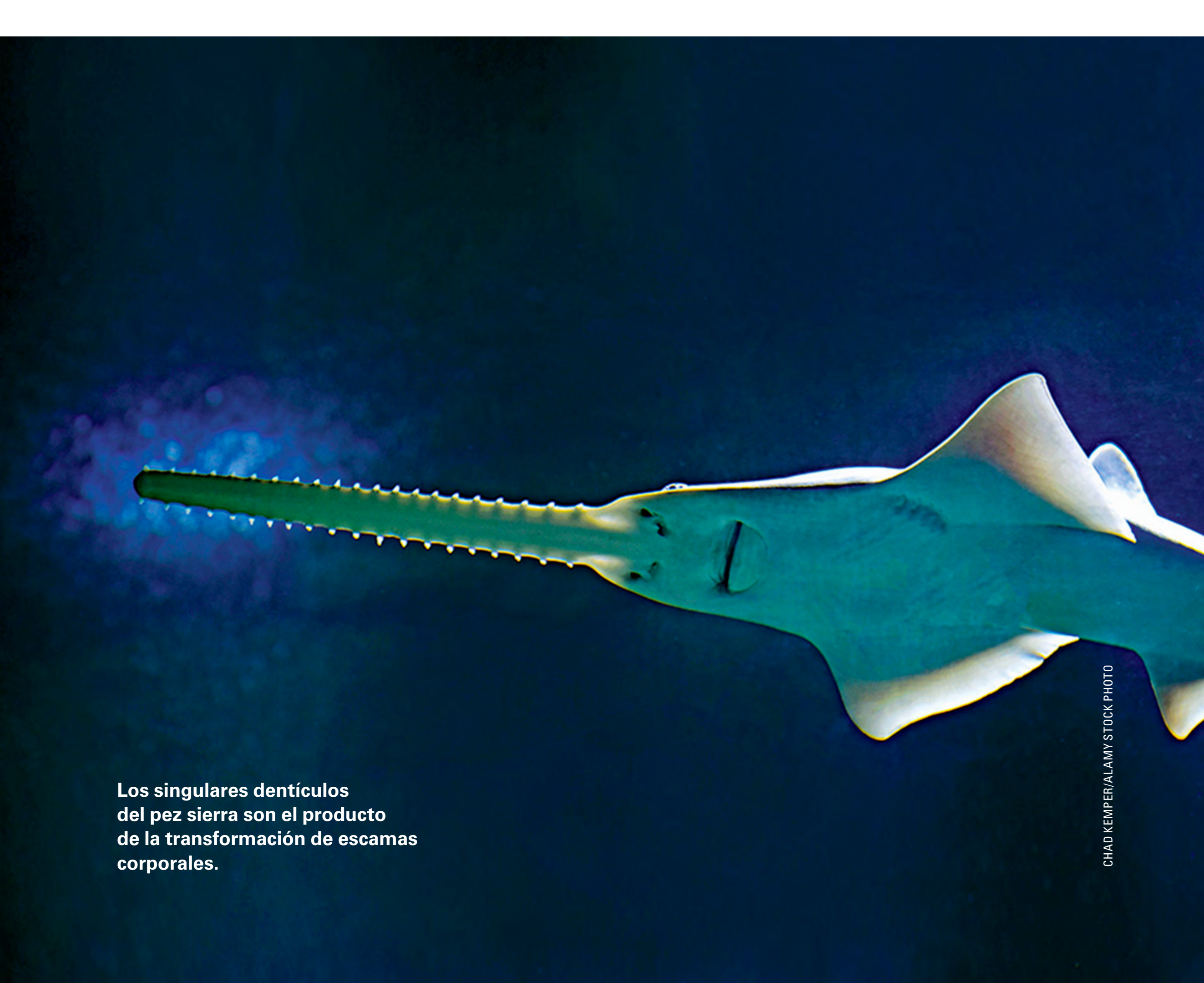
precisar en los peces fósiles, y la ubicación de ese límite es clave para entender qué tipo de tejido generó por primera vez los dientes. La mayoría de las partes blandas del cuerpo se pierden en el proceso de fosilización, por lo que solo es posible hacer deducciones de las propiedades del tejido o examinar equivalentes actuales. Por ejemplo, Huysseune estudia la boca del pez cebra actual para desentrañar la formación y el origen de los dientes.

Según Ahlberg, no hay duda de que el tejido externo es capaz de producir escamas dentiformes complejas. El estudio del pez sierra es un ejemplo patente de ese mecanismo de acción. ¿Pero pudo hacer lo mismo el tejido interno de la garganta, o un tejido mixto interno-externo cercano a la boca? Sobre ese punto siguen planeando las dudas, matiza.

Los partidarios de la hipótesis de dentro afuera afirman que sí. Haridy explica que durante un tiempo el principal argumento de este colectivo residía en un conjunto de animales anguiliformes que aparentemente habían desarrollado estructuras dentiformes mineralizadas en la garganta y en la boca, pero en ningún otro lugar del cuerpo. En las décadas de 1990 y 2000 se publicaron varios artículos acerca de esas anguilas como piedra angular de la hipótesis de dentro afuera; pero investigaciones ulteriores apuntaron a que las estructuras eran exclusivas de ese linaje y no guardaban relación con los dientes de los vertebrados. Por ahora, los científicos siguen a la caza de análogos modernos y de ejemplos fosilizados de los primeros protodientes.

Determinar con precisión el origen de los dientes probablemente no mejorará nuestra vida de forma palpable, sostiene Ahlberg (aunque señala una situación hipotética, en un futuro lejano, en que se descubra cómo regenerar las piezas dentales del mismo modo que hacen muchos animales no mamíferos). «Aun así, creo interesante saber cómo se ha creado nuestro cuerpo. Es ese ser peculiar que habitamos, y esconde pruebas de una historia muy larga y extraña», concluye.

Daniel Leonard



Los singulares dentículos del pez sierra son el producto de la transformación de escamas corporales.

CHAD KEMPER/ALAMY STOCK PHOTO

NEUROCIENCIA

CONSUMO ENERGÉTICO CEREBRAL

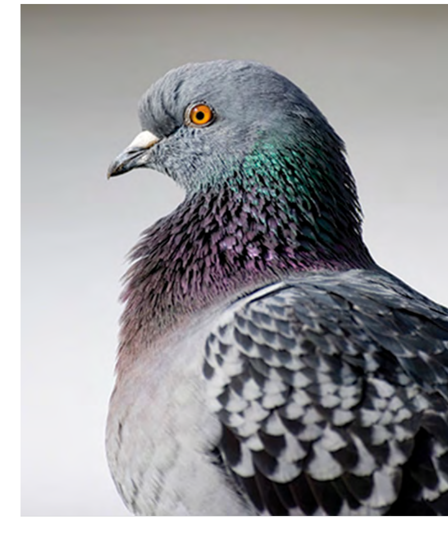
Las neuronas de las aves son extrañamente eficientes en comparación con las de los mamíferos

Hace algún tiempo se consideraba que tener un cerebro voluminoso era sinónimo de inteligencia. Pero las aves van en contra de esa lógica: con un cerebro más pequeño que una avellana, algunas saben fabricar herramientas refinadas y recuerdan los lugares donde esconden el alimento. Una investigación publicada en *Current Biology* señala que lo consiguen gracias a que sus neuronas consumen menos energía que las de los mamíferos, lo que permitiría a su cuerpo mantener una cantidad proporcionalmente mayor de ellas.

Un estudio de 2016 reveló que el cerebro aviar es más denso que el de otros muchos animales. Un ejemplo: los 20 gramos de masa cerebral del guacamayo albergan tantas neuronas como los 30 gramos del saimirí. Pero las neuronas engullen la energía; se sabe que el cerebro humano consume una quinta parte de toda la energía generada por el cuerpo, pese a que solo representa el 2 por ciento de la masa total, señala la neurocientífica aviar Kaya von Eugen, de la Universidad del Ruhr en Bochum. Ella y otros se preguntaban de qué forma el pequeño cuerpo de las aves y sus reservas de energía (basadas en la cantidad de alimento que ingieren) eran capaces de mantener tantas neuronas.

Con el fin de averiguarlo, tomaron como modelo la paloma doméstica. Inyectaron moléculas parecidas a la glucosa marcadas con una sustancia radiactiva en las venas de una decena de ellas y, por medio de un escáner, siguieron el rastro de la radiactividad a medida que viajaba por su cerebro. Con la observación del movimiento de las sustancias y la toma de muestras de sangre, averiguaron la cantidad de glucosa que consume cada gramo de tejido cerebral. A continuación, con los datos de la densidad de neuronas por gramo procedentes del artículo de 2016, calcularon la cantidad de glucosa que consume cada neurona por minuto.

Si se compara con el consumo energético de las neuronas de los roedores, del ser humano y de otros primates, una neurona de paloma consume tres veces menos que la neurona promedio de un mamífero, un resultado «sorprendente de veras», a juicio de von Eugen. Las neuronas aviares probablemente sean más pequeñas que las de los mamíferos, pero la diferencia en el consumo de energía «es tan abultada que no puede ser la única explicación». Plantea que quizás el cerebro aviar esté organizado de tal modo que las neuronas pueden intercambiar con más agilidad los impulsos nerviosos, o tal vez su temperatura corporal más elevada haga que las neuronas funcionen más rápido. Los autores especulan con que las necesidades cognitivas complejas, como el canto o el vuelo, pudieron impulsar la aparición de neuronas cerebrales más eficientes con el tiempo.



EDUCATION IMAGES/GETTY IMAGES

El descubrimiento es «bastante notorio», afirma Suzana Herculano-Houzel, neurocientífica de la Universidad Vanderbilt, quien trabajó en el estudio de 2016 pero no en esta nueva investigación. Dadas las diferencias de densidad neuronal entre el cerebro de los mamíferos y el de las aves, explica, la diferencia de consumo es «justamente la que esperarías encontrar». Las aves podrían haber desarrollado ese rasgo simplemente para poder funcionar con un escaso aporte de energía, añade Herculano-Houzel, no para satisfacer las necesidades de procesamiento avanzadas.

Las dos sienten curiosidad por saber cuánta energía consumen las neuronas de otros pájaros. A von Eugen le interesan en especial los pollos, los cuervos y los loros; incluso los cocodrilos, los parientes más cercanos en el árbol de la vida.

Tess Joosse

ECOLOGÍA

INFLUJO LUNAR EN EL MANGLAR

Descubierta la causa de un episodio natural misterioso

El enigma surgió en 2015, cuando casi el 10 por ciento de los manglares en apariencia sanos del golfo de Carpentaria, en el norte de Australia, murieron de repente. Al principio se culpó de la mortandad a un episodio inusualmente potente de El Niño, un fenómeno atmosférico y oceánico que de forma periódica desplaza agua del oeste del Pacífico e intensifica las bajamares locales. Pero ahora, un nuevo estudio publicado en *Science Advances* revela que tuvo un cómplice sigiloso: la Luna.

Los autores redujeron la lista de sospechosos analizando más de treinta años de datos captados por los satélites. «Sin duda era un conjunto fenomenal de datos», afirma el autor principal del estudio, Neil Saintilan, biogeógrafo de la Universidad Macquarie. No tardó en aparecer un patrón temporal, que se repetía cada 18 o 19 años, en que la cobertura de mangles a lo largo del golfo de Carpentaria perdía sensiblemente densidad antes de retornar a la normalidad al cabo de un par de años. Y unos nueve años después de esa mortandad, las copas de los árboles adquirían una densidad inusual.

Esa regularidad brindó una pista importante a los investigadores. «La naturaleza suele ser bastante errática. Así que, si algo muestra una gran regularidad, probablemente sea algún tipo de ciclo orbital», explica Saintilan.

«El ciclo de 18,6 años depende sobre todo de lo que llamamos la precesión de la órbita lunar», explica Sophie Wilmes, que estudia las mareas en la Universidad de Bangor, en Gales, y no ha participado en la investigación del manglar. La atracción gravitatoria de nuestro satélite alimenta a diario las mareas de la Tierra. A medida que la órbita de la Luna oscila (técnicamente, precesiona) a lo largo de 18,6 años, crea períodos regulares y prolongados de mareas inusualmente altas y bajas en ciertos lugares. Este efecto es acentuado en el golfo de Carpentaria, donde la bajamar llega a descender en promedio 40 centímetros a causa de su posición respecto al ecuador y de la morfología de la costa australiana.

Los investigadores determinaron que la mortandad de los manglares en 2015 había tenido lugar 18,5 años y medio después de la anterior. Y con El Niño de 2015, los mangles tuvieron que soportar una bajamar aún más intensa, pues el fenómeno atmosférico hizo descender las mareas otros 40 centímetros más, lo que supuso el golpe definitivo para estos árboles, que no pueden permanecer demasiado tiempo en seco.

La mecánica orbital de la precesión lunar ha sido estudiada con sumo detalle por los astrónomos, «pero no lo ha sido tanto su impacto ecológico, lo que hace interesante este artículo», opina Wilmes. En el futuro, Saintilan espera comprobar si el fenómeno afecta a los manglares de otras partes del mundo. También pretende estudiar de qué modo el ascenso del nivel del mar motivado por el cambio climático alterará ese ritmo natural. Si la elevación fuese moderada, podría paliar en parte los descensos máximos de la marea, lo que ayudaría a conservar los manglares; pero una elevación desmesurada ahogaría los mangles durante el máximo mareal del ciclo. «Podríamos prever en qué momento comenzarán a aparecer problemas serios en relación con la capacidad de adaptación de los manglares», concluye Saintilan.

Joanna Thompson

GARY BELL/OCEANWIDE/MINDEN PICTURES



Los mangles blancos (*Avicennia marina*) son sensibles al descenso del nivel del mar.

TECNOLOGÍA

CORALES EN 3D

Los escáneres dentales podrían servir para modelizar el crecimiento de los corales jóvenes

Una herramienta de uso común entre los dentistas podría encontrar pronto una aplicación ajena a la salud bucal. Un estudio reciente muestra que los escáneres dentales pueden servir como dispositivos portátiles para controlar el crecimiento de los corales jóvenes, un indicador crucial para predecir cómo afectará el cambio climático a los arrecifes.

El estrés térmico puede acabar con los arrecifes de coral maduros y limitar su regeneración. «El crecimiento, la reproducción y la supervivencia son los principales aspectos en los que nos fijamos para determinar la salud de los arrecifes», señala Kate Quigley, bióloga marina del Instituto Australiano de Ciencias Marinas. Modelizando los corales jóvenes en tres dimensiones, los investigadores pueden evaluar en qué medida se ramifican, desarrollan formas complejas y alcanzan el tamaño preciso para reproducirse. Si las condiciones del agua inhiben demasiado el crecimiento de los corales, el arrecife no logrará recuperarse.

Resulta difícil crear modelos tridimensionales de corales tan pequeños: los investigadores pueden aplicar técnicas de tomografía computarizada, sumergirlos en cera o conectar laboriosamente las medidas de un escáner comercial, pero estos métodos a menudo son lentos y proporcionan imágenes de baja resolución. Un día, al ver que su dentista empleaba un aparato alargado que enfocaba luz sobre los dientes para crear una imagen detallada en tres dimensiones, Quigley tuvo una idea: si ese dispositivo podía medir con precisión las hendiduras de sus muelas, también debería servir para escanear pequeños corales vivos. Y es que estos, al igual que los dientes, están húmedos y son ricos en calcio.

En su estudio, publicado en *Methods in Ecology and Evolution*, Quigley puso a prueba el escáner intraoral. Descubrió que permitía modelizar los corales jóvenes de una manera asequible, sencilla y mucho más rápida que las técnicas actuales, y además ofrecía más resolución. Gracias a este instrumento portátil, los científicos podrían evaluar con mayor facilidad cómo sobrellevan el estrés las especies de coral.



GARY BELL/OCEANWIDE/MINDEN PICTURES

«Los corales jóvenes son esenciales para restaurar los arrecifes y conseguir que se recuperen de alteraciones como los huracanes y las olas de calor. Por desgracia, esos ejemplares juveniles son los que peor conocemos, porque es difícil medirlos con precisión sin que se dispare el coste», comenta Joshua Madin, científico del Instituto de Biología Marina de Hawái ajeno al estudio. «Este trabajo constituye un gran ejemplo de cómo aprovechar una técnica madura desarrollada en otro campo para aplicarla a la investigación de los arrecifes de coral.»

Susan Cosier

APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

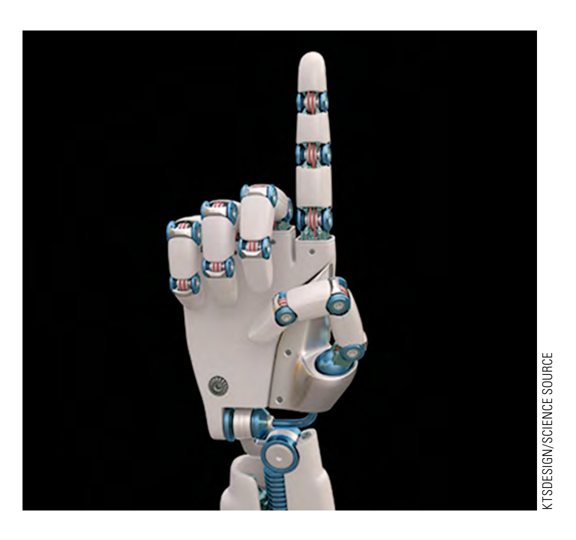
TRANSFERENCIA ROBÓTICA

Diseñan un método para traspasar habilidades de un robot a otro

Cada vez hay más robots de todas las formas y tamaños en los lugares de trabajo, desde las fábricas hasta los quirófanos. Y muchos de ellos adquieren nuevas habilidades por ensayo y error, mediante técnicas de aprendizaje automático. Un nuevo método ayuda a transferir esas destrezas de un robot a otro que posea una forma distinta, evitando así que tenga que aprender las tareas desde cero. «Es importante desde un punto de vista práctico», señala Xingyu Liu, científico computacional de la Universidad Carnegie Mellon y autor principal del estudio, que se presentó el pasado verano en la Conferencia Internacional sobre Aprendizaje Automático, celebrada en Baltimore. «Y en términos científicos, constituye un problema fundamental muy interesante.»

Supongamos que tenemos un brazo robótico con una mano de cinco dedos similar a la humana, y que lo hemos entrenado para que agarre un martillo y clave un taco de madera en un tablero. Ahora, queremos que una pinza provista de dos dedos realice el mismo trabajo. Los científicos construyeron una especie de puente entre ambos dispositivos, usando una serie de robots simulados cuya forma iba cambiando progresivamente desde la original a la nueva. Cada robot intermedio practica la tarea asignada y ajusta una red neuronal hasta que alcanza una determinada tasa de éxito. Entonces, el código del controlador se transfiere a la siguiente máquina de la cadena.

A fin de implementar esa transición desde el robot virtual inicial al final, los autores crearon un «árbol cinemático» compartido: un conjunto de nodos que representaban las partes de las extremidades, conectados por enlaces que denotaban las articulaciones. Para transferir la habilidad de usar martillos a la pinza de dos dedos, el equipo fue disminuyendo el tamaño y el peso de los nodos correspondientes a tres de los dedos, hasta hacerlos cero. En cada robot intermedio, esos dedos menguaban un poco, y la red que los controlaba tenía que aprender a adaptarse. Los investigadores también retocaron el método de



KTSDESIGN/SCIENCE SOURCE

entrenamiento para que los saltos entre robots no fueran ni muy grandes ni muy pequeños.

El sistema de la Universidad Carnegie Mellon, bautizado como REvolveR (acrónimo de Robot-Evolve-Robot), obtuvo mejores resultados que otros métodos de entrenamiento, como enseñar al robot con dos dedos desde cero. Para que la pinza alcanzara una tasa de éxito del 90 por ciento con el martillo y en otras tareas que implicaban mover una pelota y abrir una puerta, el mejor método de entrenamiento alternativo precisó entre un 29 y un 108 por ciento más de ensayos que REvolveR, a pesar de recibir una retroalimentación más detallada. En experimentos posteriores, los autores probaron su proceso en otros tipos de robots virtuales; por ejemplo, alargaron las patas de un robot con forma de araña e hicieron que volviera a aprender a andar.

«Creo que la idea es buena», valora Vitaly Kurin, científico computacional de la Universidad de Oxford que estudia robótica y aprendizaje automático y que no participó en la investigación. Aunque ya se habían diseñado retos para que un sistema de inteligencia artificial transfiriera habilidades entre distintas tareas, «esta interpolación para transmitirlas de un robot a otro es algo en lo que nunca había pensado», admite.

Matthew Hutson

PALEONTOLOGÍA

DINOSAURIOS GREGARIOS

Los tiranosaurios recién nacidos se desplazaban en grupos

Los paleontólogos no saben gran cosa de la infancia de los temibles tiranosaurios. Los fósiles de las crías recién nacidas son muy escasos y no aportan muchas pistas sobre el comportamiento de este carnívoro cuando todavía no alcanzaba los dos palmos de altura. Pero ahora los rastros de unas pisadas minúsculas, descubiertos en rocas datadas en unos 72 millones de años, ofrecen indicios de que las crías pequeñas de tiranosaurio viajaban en parejas.

Los paleontólogos descubrieron las hileras de huellas durante la exploración de una ribera fluvial situada en la formación geológica del río Saint Mary, en el sudoeste de Alberta. En el yacimiento abundan las pisadas de numerosas especies de dinosaurios. Recuerdan a «un concurrido día de playa», según describen Donald Henderson y sus colaboradores del Real Museo Tyrrell de Paleontología en la revista *Canadian Journal of Earth Sciences*.

Entre las huellas fósiles destacan siete hileras dejadas por dinosaurios diminutos, que parecen apuntar a que caminaban en parejas. «La forma de las pisadas pequeñas, así como la longitud de la zancada, encajan bastante bien con las que debieron dejar las crías recién nacidas de *Albertosaurus* o *Gorgosaurus* [ambos eran tiranosaurios]», aclara Henderson. El experto añade que las puntas afiladas de las garras indican que debieron de pertenecer a depredadores.

Los datos de los que disponemos sobre el comportamiento de los tiranosaurios proceden en su mayor parte de las mordeduras conservadas en huesos fosilizados y de un puñado de rastros de pisadas. Los cráneos dañados indican que estos cazadores consumados luchaban mordiendo a sus iguales en la cara, y las hileras de huellas que se han encontrado en la Columbia Británica indican que los adultos a veces socializaban. «El tiranosaurio no era una máquina de matar sin más», afirma la experta en huellas fósiles Lisa Buckley, que no ha participado en el nuevo estudio. Las descubiertas ahora dejan entrever que los recién nacidos se congregaban antes de abandonar el nido, de modo similar a como lo hacían algunos dinosaurios herbívoros y a cómo actúan en el presente los cocodrilos y ciertas grandes aves de hábitos terrícolas.

Buckley no descarta que las huellas pudieran haber pertenecido a otro tipo de carnívoro, pero sea cual sea el autor, su descubrimiento viene a sumarse a lo poco que sabemos sobre las costumbres de los dinosaurios. «No importa a qué tipo de terópodo perteneciesen en realidad. Las huellas descritas en el artículo son fascinantes porque nos muestran indicios de comportamiento gregario.»

Riley Black

THOMAS FUCHS

GENERACIÓN DE CONTORNOS

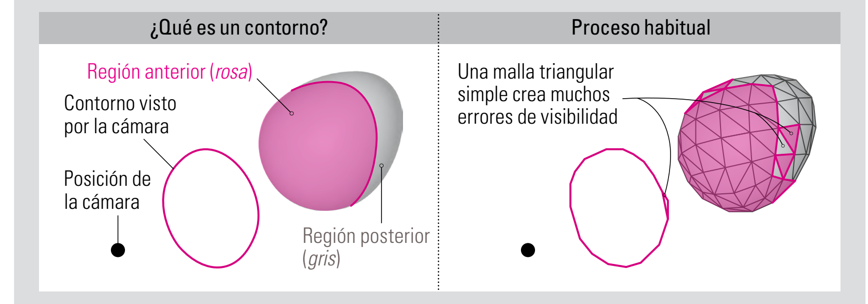
Un nuevo algoritmo aborda un problema persistente de la geometría computacional

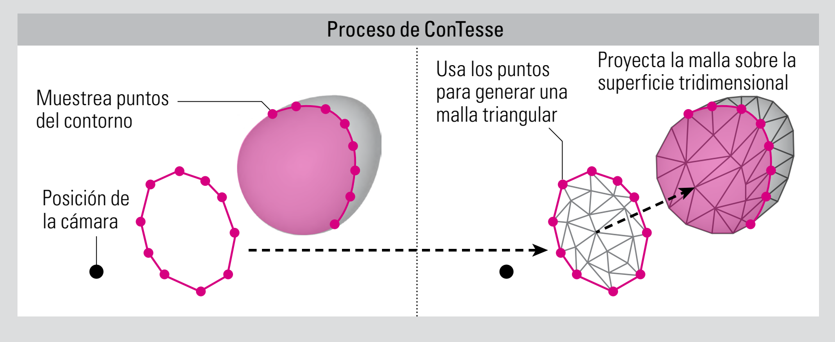
Hace casi 60 años, la científica computacional Ruth Weiss, de los Laboratorios Bell, publicó un algoritmo pionero para convertir los objetos tridimensionales en dibujos bidimensionales desde cualquier ángulo. Sin embargo, se topó con un problema a la hora de representar los contornos, un enigma de la geometría computacional que ha permanecido sin resolver durante décadas. Hoy en día, debido a la omnipresencia de la animación por ordenador, este «problema de las líneas ocultas» se ha tornado aún más acuciante.

La parte más complicada de representar un modelo tridimensional en dos dimensiones (un paso crucial en la animación por ordenador) es la cuestión aparentemente sencilla del contorno: el conjunto de líneas que delimitan un objeto tridimensional. En un mundo ideal, uno podría delinear el contorno con una precisión infinita, pero la realidad nos impone valores finitos. Así que los algoritmos modernos comienzan por recubrir el modelo tridimensional con una malla formada por pequeños triángulos y luego determinan si cada uno de ellos sería visible o no para un observador. A continua-

¿Cómo genera los contornos ConTesse?

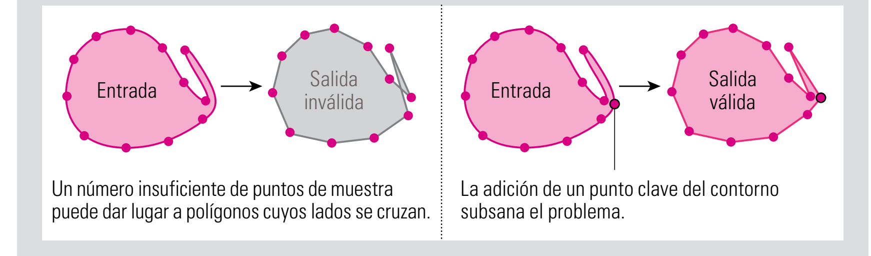
Los programas habituales crean una malla de triángulos y recubren con ella la superficie de un objeto tridimensional. Pero eso hace que resulte difícil definir el contorno, es decir, el «borde» que percibe la cámara. En cambio, ConTesse obtiene primero un contorno aproximado y lo usa para generar una malla, sorteando así los errores típicos de otros algoritmos.





Evitar curvas erróneas

La generación de contornos se complica cuando el objeto tridimensional posee partes estrechas o muy curvadas. En esos casos, ConTesse añade puntos adicionales o descruza el contorno para evitar errores en la topología.



Un número insuficiente de puntos de muestra puede dar lugar a polígonos cuyos lados se cruzan.

La adición de un punto clave del contorno subsana el problema.

FUENTE: «CONTESSE: ACCURATE OCCLUDING CONTOURS FOR SUBDIVISION SURFACES», CHENXI LIU ET AL. EN *ACM TRANSACTIONS ON GRAPHICS*, JUNIO DE 2022; AARON HERTZMANN Y PIERRE BÉNARD (*gráfico*), ADAPTADO POR AMANDA MONTAÑEZ

ción, los algoritmos usan estos triángulos para construir los segmentos que forman el contorno. Sin embargo, cuando el resultado se emplea en animaciones estilizadas, a veces surgen líneas defectuosas y parpadeantes, por motivos que no se conocían a ciencia cierta.

Se ha demostrado que es imposible generar una malla triangular lo bastante fina como para evitar todos los errores de este tipo. Como explica Stéphane Grabli, investigador de Reality Labs (la sección de realidad virtual y aumentada de Meta) nominado al Óscar a los mejores efectos especiales, «se pensaba que, con suficientes subdivisiones, sería posible crear una malla que permitiera calcular de forma exacta la visibilidad de esos contornos. Pero resulta que no es así». Los consiguientes errores limitan la complejidad de las representaciones no fotorrealistas, añade Grabli.

Ahora, en un artículo publicado en la revista *ACM Transactions on Graphics*, la científica computacional de la Universidad de la Columbia Británica Chenxi Liu y sus colaboradores proponen una solución algorítmica, denominada ConTesse, que se centra en fijar el contorno en vez de la malla. Al ampliar 1600 veces los contornos generados mediante algoritmos, Liu identificó pequeños recodos donde las líneas del contorno se cruzaban de forma incorrecta, lo que impedía determinar sistemáticamente si los triángulos eran visibles o no para el observador. «Experimenté con muchas superficies y vi que el algoritmo fallaba en la mayoría de ellas», señala.

El nuevo algoritmo primero delimita los bordes de la figura tridimensional por medio de segmentos rectos, luego «aplasta» este contorno aproximado hasta hacerlo bidimensional y trata de recubrir su interior con triángulos. Si las líneas de dicha malla interior se entrecruzan por error, el algoritmo modifica esa parte del contorno, por ejemplo, añadiendo segmentos más cortos. Entonces, el algoritmo vuelve a generar la malla para el nuevo contorno y la proyecta sobre el objeto tridimensional a fin de realizar una última comprobación de la visibilidad.

La novedad es que los investigadores se percataron de que el problema radicaba en el propio contorno. Antes, ni siquiera estaba claro si podían producirse tales contornos inválidos, así que las correcciones trataban los síntomas (el parpadeo) en lugar de la causa, indica Liu. Grabli, que no participó en el estudio, coincide: «El artículo demuestra por qué no podían funcionar las primeras soluciones».

Lyndie Chiou

ZOOLOGÍA

UN CICLO BIOLÓGICO INVEROSÍMIL

Un parásito manipula el comportamiento de al menos tres hospedadores para viajar del agua al aire y retornar al medio acuático

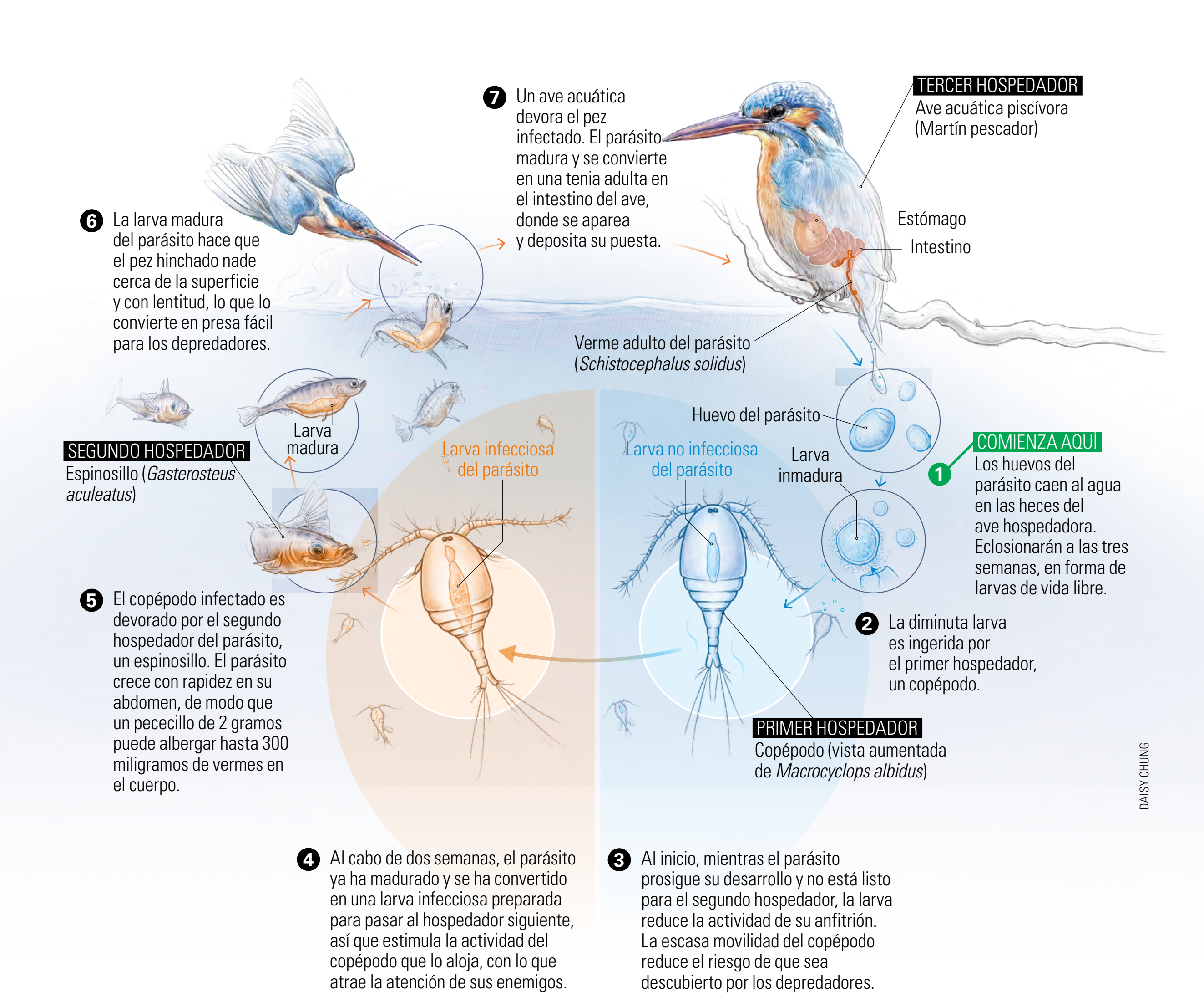
Los parásitos dan un nuevo significado al tópico de «comer o ser comido». Con frecuencia su ciclo biológico solo se cierra si son ingeridos por un hospedador (o por varios), lo que reduce a mínimos sus posibilidades de supervivencia. A fin de mejorarlas, ciertos parásitos alteran el comportamiento del hospedador para aumentar las probabilidades de que este acabe siendo devorado.

El cestodo *Schistocephalus solidus* necesita de hospedadores mucho mayores que él. Primero deberá infectar a un pez espinosillo (*Gasterosteus aculeatus*), en cuyo interior crecerá, y a continuación, a un ave, donde procreará. El problema radica en el tamaño de sus larvas que, con menos de un milímetro de longitud, resultan demasiado pequeñas para ser devoradas por el pez.

Así pues, la larva ha de ser comida primero por un copépodo, un crustáceo de aspecto similar a un camarón diminuto. Cuando está lista para pasar al siguiente hospedador, hace que el copépodo se mueva y se contornee; si todo va bien (para el parásito), un espinosillo devorará al crustáceo. En el interior del pez, la larva crecerá hasta alcanzar una talla enorme, lo que hará que el infortunado espinosillo boquee agotado en la superficie del agua, donde es probable que sea atrapado por un pájaro. En el cuerpo de este último, el parásito madurará, consumará la cópula y sus huevos regresarán al agua con los excrementos del ave. Así el ciclo dará comienzo de nuevo.

La parasitóloga Nina Hafer-Hahmann, al estudiar el cestodo *S. solidus* en el Instituto Max Planck de Biología Evolutiva, en Plön, demostró que el parásito manipula el comportamiento del copépodo que lo aloja y que esa facultad es hereditaria.

Madhusree Mukerjee



EL ENGAÑO DE *TOXOPLASMA*

El parásito manipula las células inmunitarias para propagarse por el organismo humano

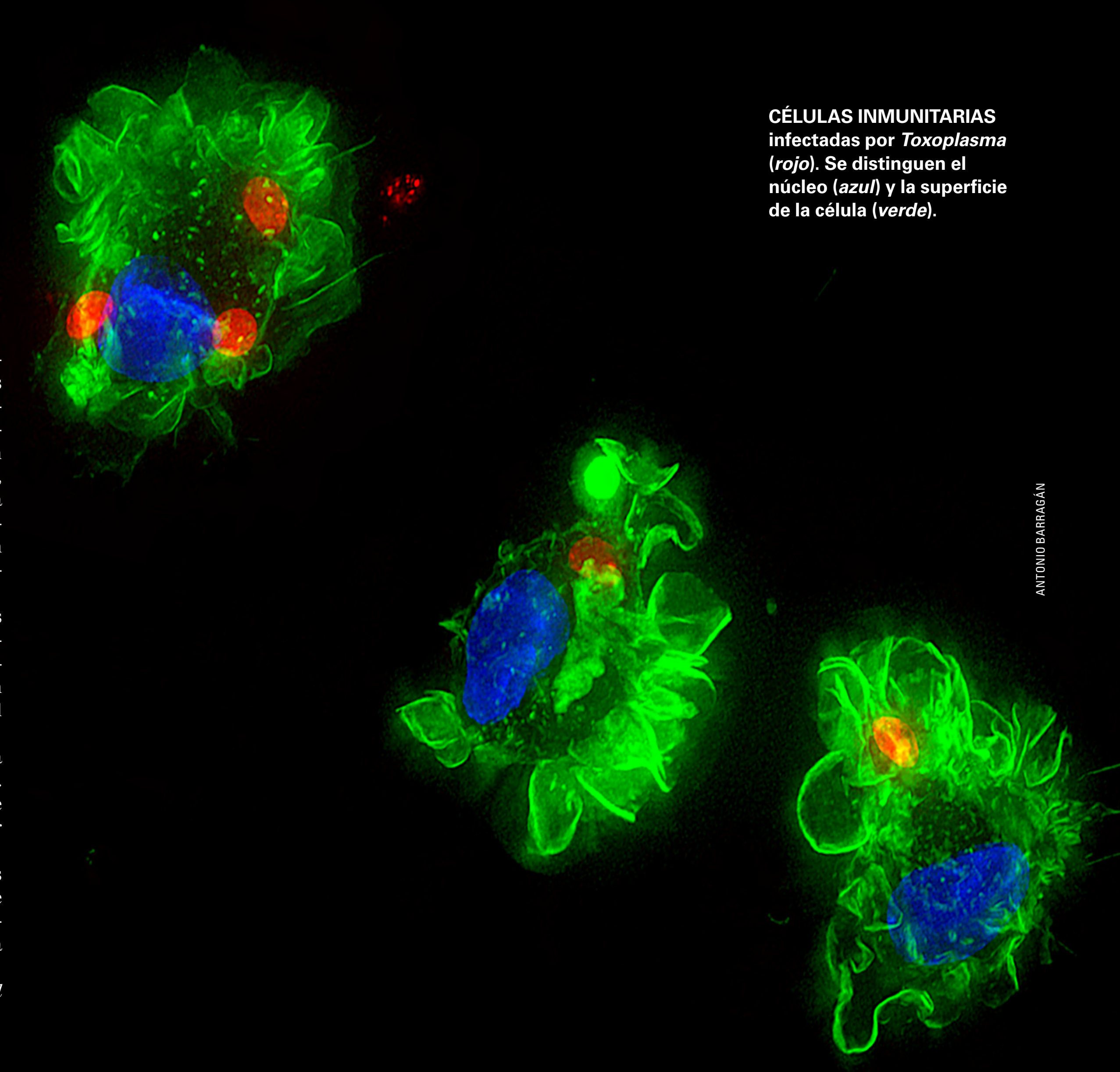
Toxoplasma gondii es uno de los parásitos con más éxito en todo el mundo. Cientos de millones de personas están infectadas con él, a menudo sin saberlo. Los humanos solo actuamos como hospedadores intermedios; donde se reproduce el patógeno es en los gatos, que lo propagan una y otra vez. Aunque todavía no está claro si nos perjudica, cada vez hay más **indicios** de que nos hace más vulnerables a los trastornos neuropsiquiátricos. Arne ten Hoeve, de la Universidad de Estocolmo, y su equipo **han descrito** ahora en *Cell Host & Microbe* cómo el parásito secuestra nuestras células inmunitarias y viaja con ellas por todo el cuerpo.

T. gondii inyecta cierta proteína en el núcleo de unas células inmunitarias denominadas macrófagos, que, como consecuencia, cambian de identidad y se comportan como otro tipo de células inmunitarias: las células dendríticas. Estas se caracterizan por desplazarse con rapidez por el cuerpo, lo que facilita que el patógeno llegue al cerebro y a otros órganos.

«Es sorprendente que el parásito consiga secuestrar la identidad de las células inmunitarias de forma tan inteligente. Nuestros resultados pueden explicar por qué *Toxoplasma* se propaga con tanta eficacia en el organismo», afirma el coautor Antonio Barragán, también de la Universidad de Estocolmo.

En la naturaleza, el parásito se propaga sobre todo de los roedores a los gatos. Los humanos se infectan al comer carne cruda o por el contacto con los gatos, en especial con sus heces. En las mujeres embarazadas, el feto es muy vulnerable a la infección.

Daniel Lingenhöhl



CÉLULAS INMUNITARIAS infectadas por *Toxoplasma* (*rojo*). Se distinguen el núcleo (*azul*) y la superficie de la célula (*verde*).

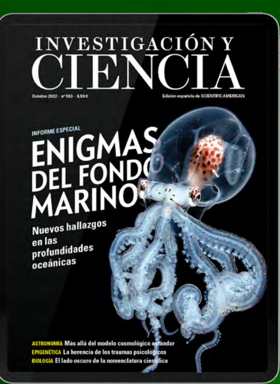
ANTONIO BARRAGÁN

Del 15 de diciembre al 6 de enero

Descuento del 25 %

en suscripciones





Código promocional

FELIZNAVIDAD22

www.investigacionyciencia.es



¡Aprovecha para regalar ciencia!

1. Suscríbete a través de la web y marca la casilla «Regalo» en la cesta.
2. Personaliza tu mensaje de felicitación.
3. El destinatario lo recibirá en su bandeja de entrada en la fecha que elijas.



EL ATERRIZADOR Peregrine, de la empresa Astrobotic, tiene previsto partir hacia la Luna a principios de 2023. Transportará una combinación de experimentos científicos y cargas privadas.

EXPLORACIÓN ESPACIAL

LA NUEVA CARRERA A LA LUNA

Rebecca Boyle | Varias naves comerciales compiten por llegar a la superficie lunar. ¿Lograrán poner en marcha una nueva economía espacial?

DON FOLEY

Un día de diciembre de 2021, John Walker Moosbrugger, que a sus 25 años era ya director de proyectos en la empresa emergente de robótica lunar Astrobotic, se sentó frente a la «sala blanca» de la compañía y observó cómo instalaban un instrumento más viejo que él en un aterrizador lunar. El vehículo, llamado Peregrine, era un contenedor de cuatro patas tan grande como un *jacuzzi*, todo envuelto en aluminio. El instrumento instalado se denominaba SEAL (Alteraciones en la Superficie y la Exosfera causadas por Aterrizadores, en inglés) y era un sensor del tamaño de una caja de zapatos, diseñado para estudiar los efectos de un alunizaje sobre el polvo lunar.

Peregrine, cuyo despegue está previsto para principios de 2023, es una de las muchas misiones que se aprestan a lanzar las empresas privadas, tras prepararse durante años. Desde que se fundó en 2007 para competir en el ya extinto Google Lunar XPRIZE, Astrobotic no ha dejado de trabajar en su aterrizador ni de firmar convenios con empresas que querían llevar sus instrumentos a bordo, con sus miras puestas en un futuro lanzamiento. Y en 2018, la NASA instauró un esquema de financiación que convertiría a Astrobotic en una de varias empresas con transbordadores lunares para mediados de esta década. Moosbrugger lleva desde entonces preparando cargas útiles como SEAL. «De repente, a finales de octubre, empezaron a aparecer [representantes de la NASA]», relata. «Todo se tornó muy real.»

En algún momento de los próximos meses, las misiones estadounidenses volverán a la Luna después de medio siglo. Las naves no estarán tripuladas (al menos por ahora) y ni siquiera habrán sido construidas por el Gobierno. La próxima flota lunar estará formada por naves espaciales privadas que transportarán experimentos científicos y otras cargas útiles para clientes de pago, entre ellos la NASA. El aterrizador Peregrine será propulsado por el nuevo cohete Vulcan Centaur de United Launch Alliance, cuando este lleve a cabo su viaje inaugural. Otra empresa emergente, Intuitive Machines, prevé lanzar su aterrizador lunar Nova-C en marzo de 2023, a lomos de un cohete Falcon 9 de SpaceX. Se espera que otra docena de compañías se sumen a ellas en los próximos seis años, acarreando cargas que irán desde un magnetómetro y suministros para una futura base lunar hasta pequeñas cantidades de restos humanos incinerados.

EN SÍNTESIS

Desde principios de 2023, despegarán hacia la Luna varios aterrizadores comerciales que transportarán experimentos científicos y otras cargas útiles para clientes de pago como la NASA, que ha subvencionado esas misiones.

Las empresas implicadas esperan que eso impulse un mercado en torno a los metales, el agua y el helio de nuestro satélite, recursos que serían muy valiosos si se estableciera una base lunar para lanzar cohetes al sistema solar.

Esas misiones público-privadas permitirán obtener resultados científicos más rápido y por menos dinero, y podrían garantizar un flujo regular de visitas a la Luna, pero quizá socaven las grandes misiones lunares de la NASA, más adecuadas para cierto tipo de investigaciones.

Esos serán solo los últimos hitos en el crecimiento paulatino de un sector comercial relacionado con el espacio. SpaceX lanzó su primer cohete en 2006 y lleva desde 2012, junto con otras empresas privadas como Northrop Grumman, transportando cargas (y, más recientemente, tripulantes) a la Estación Espacial Internacional. En 2021, después de un largo retraso, quedó inaugurada la era del turismo espacial privado, cuando clientes famosos y multimillonarios comenzaron a viajar hasta el espacio cercano a la Tierra.

Pero ir a la Luna es un objetivo de mayor enjundia. Para llegar a nuestro satélite, se necesita más combustible que en un lanzamiento normal, ya que los cohetes deben escapar de la atracción de la Tierra y adoptar una trayectoria que los encamine hacia la Luna. Además, el viaje dura unos tres días, frente a los pocos minutos que se tarda en alcanzar la órbita terrestre. Aunque compañías como SpaceX tienen pensado enviar naves tripuladas a nuestro satélite, ninguna ha superado la fase de prototipo, así que, por el momento, la nueva carrera a la Luna está liderada por pequeñas empresas como Astrobotic.

La NASA no ha abandonado el desarrollo de naves espaciales; con su programa Artemisa, hermano de las misiones Apolo, pretende volver a llevar astronautas a la superficie lunar para 2025. La agencia lleva trabajando desde 2011 en su nuevo cohete para ir a la Luna, el Sistema de Lanzamiento Espacial, y los científicos siguen planeando nuevas misiones en el marco de sus programas de exploración planetaria. Pero subcontratar estas misiones más pequeñas e inmediatas es parte de la estrategia moderna de la NASA,

consistente en pagar a empresas privadas para que hagan una parte del trabajo. Los responsables de la NASA afirman que un mercado lunar comercial aumentará la competencia, rebajará los precios y asegurará un interés continuado por ir a la Luna, con independencia de quién ocupe la Casa Blanca. Por su parte, las empresas esperan que el transporte de cargas subvencionado por la NASA provoque una expansión económica, del mismo modo que el ferrocarril transcontinental impulsó el desarrollo del Oeste de EE.UU. en el siglo XIX. Esta vez la carrera sería en pos de los metales, el agua y el helio de nuestro satélite, materiales que serían muy valiosos si comenzáramos a lanzar cohetes hacia el sistema solar desde una base lunar.

Entretanto, algunas misiones científicas que llevaban años esperando o que tenían pocas posibilidades de despegar están listas para llegar a nuestro satélite. SEAL, por ejemplo, es una copia sobrante de un instrumento que se construyó en 1996 para otra misión. Entonces no voló, pero ahora debería tener su oportunidad, gracias a esta carrera público-privada hacia la Luna.

Desde 2013, se han invertido 250.000 millones de euros en 1688 empresas relacionadas con el sector espacial

Los científicos lunares contemplan toda esta actividad con una mezcla de esperanza y escepticismo. «Aún estoy al principio de mi carrera, y ya es la segunda o tercera vez que escucho que regresamos a la Luna», comparte Angela Stickle, planetóloga del Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins. «Pero creo que esta vez es la buena. Los lanzamientos ya están programados y pagados, y eso es algo que no había sucedido antes.»

Por supuesto, la sostenibilidad de cualquier iniciativa privada está supeditada a los beneficios, y las perspectivas de una fiebre del oro en la Luna aún son meras especulaciones. ¿Existe realmente un mercado a largo plazo para los aterrizadores lunares comerciales? La respuesta depende de a quién le preguntemos y de lo que pueda lograr la nueva flota de robots.

Siete envíos en tres años

Podría decirse que las misiones privadas a la Luna constituyen el paso siguiente e inevitable de un proceso que la NASA puso en marcha hace 17 años, cuando creó los Servicios Comerciales de Transporte Orbital (COTS, por sus siglas en inglés). La agencia concibió este programa con el fin de remunerar a empresas privadas para que desarrollaran naves capaces de volar a la Estación Espacial Internacional tras la retirada de los transbordadores espaciales. La NASA invirtió 500 millones de dólares a lo largo de cinco años para ayudar a SpaceX y Orbital Sciences a construir cohetes y naves de carga. El programa fue un éxito y dio lugar a nuevas lanzaderas y vehículos reutilizables que transportan suministros de manera fiable hasta la estación espacial. Desde entonces, SpaceX ha realizado 156 lanzamientos de cohetes Falcon 9 (desarrollados con el capital inicial de la NASA), y en 2020 también comenzó a llevar astronautas a la estación.

Puede que Thomas Zurbuchen tuviera en mente el legado de ese programa comercial en diciembre de 2017, cuando la Administración Trump anunció su intención de volver a la Luna. El presidente quería enviar astronautas allí para 2024, y Zurbuchen, astrofísico al frente de la Dirección de Misiones Científicas de la NASA, vio una oportunidad para aumentar el presupuesto científico de la agencia espacial. Y se hizo una pregunta: «¿Qué ha pasado con las empresas que compitieron en el infausto Google Lunar XPRIZE?».

La competición, creada en 2007 por Google y la Fundación XPRIZE, ofrecía 20 millones de dólares al primer aterrizador construido con financiación privada que lograra posarse en la superficie lunar y enviar un vídeo a la Tierra. Pero el premio se declaró desierto al cabo de un decenio: viajar a la Luna era demasiado difícil y costoso para que ese botín relativamente exiguo mereciese la pena. Una antigua participante, la empresa emergente israelí SpaceIL, acabó llegando a nuestro satélite en abril de 2019, aunque su nave se estrelló durante el alunizaje. Pero, en sus esfuerzos por ganar el premio, varias compañías habían construido prototipos de aterrizadores y vehículos de exploración capaces de transportar a la Luna todo tipo de cargas, en ocasiones con un coste mucho menor que una misión tradicional

de la NASA. Entre ellas estaban Astrobotic, Moon Express, y hasta firmas más pequeñas, como la desaparecida Micro-Space. Al finalizar la competición, muchas de estas empresas siguieron trabajando en sus naves e incluso (en el caso de Astrobotic) captando clientes para futuros viajes.

En 2018, en vista de los avances de esas compañías y del éxito del programa COTS, la NASA creó los Servicios Comerciales de Carga Útil Lunar (CLPS, por sus siglas en inglés), un nuevo programa dotado con 2600 millones de dólares. La agencia espacial alegó que una estrategia de alto riesgo y beneficios elevados conllevaría un mayor rendimiento científico y, además, impulsaría un incipiente mercado lunar. En el marco del programa CLPS (coloquialmente conocido como «clips»), la NASA paga a empresas privadas para que construyan aterrizadores, vehículos de exploración y otros instrumentos, y para que transporten en ellos experimentos científicos. Zurbuchen supuso que esta vez las probabilidades de éxito serían mayores que en 2007, ya que la tecnología lunar estaba más avanzada y había más cohetes capaces de volar a nuestro satélite.

La geopolítica también contribuyó al despegue del programa CLPS. Zurbuchen logró asegurar esos 2600 millones gracias tanto a las ambiciones lunares de Trump como a los temores estadounidenses ante el auge de China en la exploración espacial. En diciembre de 2020, un aterrizador y un vehículo de exploración chinos llegaron a nuestro satélite, y recogieron muestras que luego fueron traídas a la Tierra. «Tenemos todas las razones para creer que China es un competidor muy agresivo que podría volver a la Luna con *taikonautas*», declaró en noviembre de 2021 el administrador de la NASA, Bill Nelson, refiriéndose a los astronautas chinos. «La postura de la NASA, y creo que del Gobierno de Estados Unidos, es que queremos llegar allí antes.» De repente, las empresas que habían competido en el Lunar XPRIZE entraban de nuevo en juego, portando la antorcha de los intereses espaciales americanos. «En 2018, hubo una misión lunar china y ningún contrato para una misión estadounidense que involucrase un aterrizador lunar», resume Dan Hendrickson, vicepresidente de desarrollo empresarial de Astrobotic. «Si saltamos a 2021, ahora existen siete de esos contratos en EE.UU. Es un cambio radical.»

Las misiones de la NASA suelen dividirse en tres clases. Las más destacadas, como los vehículos de exploración de Marte o el telescopio espacial James Webb, reciben la mayor financiación y atención. Son proyectos de miles de millones de dólares, que suelen durar varias décadas y en los que trabajan equipos de científicos e ingenieros de la agencia espacial y de universidades asociadas. Los proyectos un poco más pequeños se encuadran en la clase New Frontiers y cuentan con una financiación máxima de 850 millones de dólares. Las misiones Discovery son las más austeras, con un presupuesto que no puede superar los 450 millones de dólares. El lanzamiento de cualquiera de estos proyectos exige años de planificación y preparación, y algunos nunca son seleccionados: los científicos pueden pasarse buena parte de su carrera intentándolo antes de obtener una misión Discovery o de lograr que un instrumento viaje en una nave de la clase New Frontiers.

El programa CLPS es diferente. Cada aterrizador comercial puede transportar una docena de cargas útiles sin relación entre ellas. En vez de pasarse años preparando una propuesta para una misión Discovery, los científicos pueden tratar de incluir un instrumento sencillo en una nave del programa CLPS y obtener resultados más rápido y por menos dinero. «No hace falta dedicar quince años a construir una nave espacial si puedes lograrlo en dos», señala Stickle.

Hasta abril de 2022, el programa CLPS había adjudicado contratos para siete expediciones a cargo de cuatro empresas: Astrobotic, Intuitive Machines, Firefly Aerospace y Masten Space Systems. El aterrizador Peregrine de Astrobotic y los dos Nova-C de Intuitive Machines serán los primeros en partir. «Hemos pasado de estar 50 años sin mandar nada a la Luna a programar siete envíos en los próximos tres años y medio», destacó Chris Culbert, director del programa CLPS en el Centro Espacial Johnson de la NASA, durante una mesa redonda celebrada en noviembre de 2021.

Destacada labor científica

Los experimentos no serán lo único que transportarán las primeras misiones privadas a la Luna. El inventario de Astrobotic incluye artículos de clientes como la Agencia Espacial Mexicana, que lanzará los primeros instrumentos lunares desde Latinoamérica; una empresa japonesa llamada Astroscale, que enviará una «cápsula del tiempo» con mensajes de niños de todo el mundo; y dos compañías que prometen enviar restos humanos incinerados a la superficie lunar, por encargo de familiares que deseen una despedida celestial para su ser querido.

Pero, si consiguen alunizar sin incidentes, las misiones también desempeñarán una importante labor científica y podrían aclarar algunos de los misterios más acuciantes que aún persisten sobre la Luna. Los investigadores debaten sobre cómo y cuándo se formó exactamente nuestro satélite [*véase* «El origen de la Luna», por Simon J. Lock y Sarah T. Stewart; Investigación y Ciencia, julio de 2019]. Se preguntan por la naturaleza de sus seísmos, la erosión provocada por el viento solar o la cantidad de agua que alberga. Y tampoco saben con certeza por qué las dos caras de la Luna tienen una apariencia tan diferente [*véase* «La Luna de las dos caras», por P. Surdas Mohit; Investigación y Ciencia, septiembre de 2008]. La resolución de estos enigmas sobre nuestro satélite nos ayudaría a comprender cómo podríamos vivir y trabajar allí en un futuro. Y, desde una perspectiva más amplia, al investigar estas cuestiones entenderemos mejor el proceso de formación de la Tierra y su satélite, la evolución del Sol y quizás incluso si un cuerpo como la Luna es crucial para que acabe surgiendo la vida.

La NASA eligió instrumentos científicos sencillos y baratos para los primeros experimentos del programa CLPS. En algunos casos, buscaron componentes como el instrumento SEAL, que permanecían olvidados en un rincón tras formar parte de otras naves o haber sido descartados en misiones anteriores. Robert Grimm, planetólogo del Instituto de Investigación del Sudoeste que está construyendo varios instrumentos para distintos aterrizadores, explica que un responsable de la NASA le comentó en broma: «Estamos tan desesperados por conseguir cargas útiles que enviaríamos rocas de vuelta a la Luna».

En su primera misión, el aterrizador Peregrine de Astrobotic transportará dos docenas de cargas útiles (incluido el instrumento SEAL) hasta el Lago de la Muerte, una llanura hexagonal de lava situada en el nordeste de la cara visible de la Luna. Uno de los Nova-C de Intuitive Machines llevará otras seis cargas al Océano de las Tormentas, un vasto mar lunar en el límite occidental de nuestro satélite. El otro aterrizador tiene previsto acarrear un espectrómetro de masas y un taladro llamado PRIME-1, que extraerá muestras de hielo lunar en la región del polo sur. Otras misiones posteriores intentarán alunizar en lugares más arriesgados, pero con características geológicas más interesantes, y llevarán consigo instrumentos para estudiar la geología y el campo magnético de la Luna, entre otros objetivos. Astrobotic incluso ha firmado un contrato de 199,5 millones de dólares para transportar un gran vehículo de exploración llamado VIPER, que buscará agua en el polo sur lunar a finales de 2024.

David Blewett, planetólogo del Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins, es el investigador principal de la misión Lunar Vertex, que fue seleccionada en junio de 2022 para despegar en 2024. El proyecto investigará las anomalías magnéticas en una región llamada Reiner Gamma, que posee una brillante marca superficial con forma de renacuajo. Ese remolino se conoce desde el Renacimiento, pero todavía no está claro cómo se formó. Algunas teorías sugieren que el campo magnético de la Luna cambió el movimiento del polvo superficial, mientras que otra postula que la superficie lunar se vio modificada por la colisión con la cola de un cometa. Lunar Vertex estudiará esa zona a lo largo de aproximadamente medio día lunar (13 días terrestres) para intentar determinar aspectos como el origen y las propiedades magnéticas del remolino.

DON FOLEY

LA EMPRESA Firefly Aerospace espera que su aterrizador Blue Ghost sea uno de los primeros vehículos privados en llegar a la Luna.

Con el proceso habitual de selección de misiones de la NASA, Lunar Vertex habría formado parte de una nave de 450 millones de dólares. En cambio, volará por tan solo 30 millones, como uno de los instrumentos a bordo del aterrizador de Intuitive Machines. La propia nave es más barata y sencilla que las de las típicas misiones planetarias: Nova-C es un esbelto hexágono con cinco patas, con un tamaño similar al de una cabina telefónica. Brett Denevi, planetóloga del Laboratorio de Física Aplicada, supervisa el diseño de la cámara de la misión. «Los sensores de Lunar Vertex son literalmente como los de la cámara de un teléfono móvil», detalla.

Algunos de los instrumentos de Grimm viajarán a la cuenca de Schrödinger, un cráter de impacto en la cara oculta de la Luna que presenta un «anillo de picos»: una meseta o anillo secundario dentro del cráter, que constituye el sello distintivo de un gran impacto. Esa misión transportará un sismómetro lunar (el primero que aterrizará en la Luna desde las misiones Apolo y el primero que lo hará en la cara oculta), junto con un taladro para estudiar el interior del terreno. Grimm afirma que esos dispositivos ofrecerán una visión más completa de la estructura y temperatura internas de la Luna, lo que ayudará a dilucidar el origen del satélite.

Otros experimentos que deberían despegar en los próximos seis años estudiarán el efecto de los alunizajes sobre el regolito lunar, inspeccionando la nave espacial y su entorno. También investigarán la radiación ambiental de la Luna, analizarán distintos compuestos (dióxido de carbono, metano y otras sustancias volátiles), buscarán agua helada y monitorizarán las ondas de radio en la superficie, con vistas a la futura construcción de radiotelescopios en la Luna [*véase* «El cosmos desde la cara oculta de la Luna», por Anil Ananthaswamy; Investigación y Ciencia, julio de 2021]. Todas estas misiones darán respuesta a preguntas científicas cruciales, demostrarán nuevas técnicas, prepararán a investigadores y astronautas para futuros desembarcos humanos y, si los socios industriales ven cumplidos sus deseos, alentarán una nueva forma de economía lunar.

¿Un negocio rentable?

Desde luego, no todos los inversores y emprendedores que participan en este sector de la industria privada espacial lo hacen movidos por su curiosidad científica: buscan ganar dinero con los recursos lunares y la profusión de personas y empresas interesadas en ellos. Pero el valor de esos materiales todavía es hipotético.

Tomemos como ejemplo el agua, que podría ser abundante en el interior de algunos cráteres sumidos en una oscuridad permanente. En principio, con tiempo y esfuerzo, sería posible disociar el agua en sus componentes, oxígeno e hidrógeno, para utilizarlos como combustible de cohetes. No obstante, la explotación del agua lunar solo será rentable si la Luna acaba albergando una plataforma de lanzamiento activa, que impulse una economía centrada en la exploración del sistema solar. Además, crear la infraestructura necesaria para convertir el agua en propelente para cohetes en otro cuerpo celeste será difícil, aun si existe un mercado que lo justifique.

La mayoría de los inversores creen que es posible obtener beneficios en la Luna mucho antes de que se convierta en una explotación minera. «Si eso fuera todo, estaría muy nervioso», admite Chad Anderson, socio directivo en la firma de capital riesgo Space Capital, que en 2016 invirtió en Astrobotic. Anderson ha hecho un seguimiento de las inversiones en empresas relacionadas con el sector espacial y revela que, desde 2013, se han inyectado 250.000 millones de euros en 1688 de estas compañías. Eso demuestra que los inversores de riesgo ven grandes oportunidades más allá de los confines terrestres.

Anderson opina que esta oleada de experimentos podría conducir a un ciclo rentable, donde los primeros instrumentos realicen descubrimientos prometedores que susciten nuevas preguntas y, en última instancia, un renovado interés entre quienes aspiran a encontrar y extraer lo que la Luna tenga que ofrecer. «El programa CLPS es una forma muy elegante de estimular un mercado y de lograr que muchas empresas participen en él», declara. «Si establecemos una analogía con la minería, emerge un sector económico en torno a la gente que quiere buscar oro, y entonces les empiezas a vender picos, palas y monos de trabajo.» En el caso de la Luna, las palas serían sistemas de comunicaciones o energía solar, servicios que puede ofrecer un proveedor de aterrizadores a cambio de dinero.

Hanh Nguyen, estudiante de posgrado en la Escuela de Economía de Londres que analiza políticas públicas, con especial interés en la industria espacial privada, considera que la financiación gubernamental podría espolear un nuevo mercado. «Creo que, a medida que el Gobierno ofrezca

oportunidades para que algunas empresas desarrollen sus productos, otras compañías identificarán necesidades que puedan satisfacer con nuevos productos y servicios», señala.

Sin embargo, SpaceX contaba desde el principio con una base de clientes. Nguyen resalta que entre los primeros figuraban el Gobierno de Malasia y agencias estadounidenses como el Departamento de Defensa. En el caso de la Luna, los posibles clientes no son tan obvios, subraya Matthew Weinzierl, catedrático de la Escuela de Negocios de Harvard que estudia la economía del espacio. «¿Dónde reside el gran potencial?», se pregunta. «¿De dónde provendrá la gran demanda para que se materialice esa visión de un concurrido mercado lunar? Ese es justo el reto al que me enfrento y, supongo, al que se enfrenta la industria. Está claro que hay quien confía en que actividades como el turismo o la producción industrial generen beneficios.» No obstante, Weinzierl añade que en la Tierra hay gran cantidad de capital disponible, y el espacio representa un nuevo lugar donde invertirlo.

Capitalismo subvencionado

Los científicos lunares se hallan divididos ante la perspectiva de que se lleven a cabo vuelos privados frecuentes y baratos a la Luna. Varios investigadores destacados reclaman más transparencia y una mejor planificación. «Creo que hay sentimientos encontrados», apunta Stickle.

Desde las misiones Apolo, la exploración de nuestro satélite se ha basado en una delicada simbiosis entre el jingoísmo y la arrogancia inherentes a los viajes espaciales y el enfoque más pragmático y orientado a objetivos de la exploración científica. «Lo interesante de la ciencia lunar es que a menudo se ve atrapada en estas cuestiones más generales que no siempre responden a intereses científicos», incide Denevi. Incluso quienes están entusiasmados por incluir sus experimentos en los primeros vuelos privados admiten que el programa CLPS podría socavar las grandes y audaces misiones lunares de la NASA. Algunos investigadores lo consideran una verdad incómoda de la que nadie habla, y señalan que la plétora de pequeñas misiones del programa CLPS quizá no permitan realizar el mismo tipo de investigaciones que una misión de más envergadura.

Los líderes de la comunidad científica intentan concienciar a sus colegas de las oportunidades que ofrece el programa CLPS, sin perder de vista sus posibles inconvenientes, asegura Amy Fagan, directora del Grupo de Análisis para la Exploración Lunar e investigadora en la Universidad de Carolina Occidental. Algunos expertos lunares tienen sus miras puestas más allá del programa CLPS, bien porque les preocupa poner en peligro sus posibilidades de conseguir una misión Discovery de la NASA, o simplemente porque quieren hacer más cosas.

La otra cara de la moneda, añade Fagan, es que el programa CLPS podría sobrellevar los recortes presupuestarios y los vaivenes políticos mejor que los proyectos estrictamente gubernamentales, más grandes y caros. Hasta ahora, la Administración Biden ha adoptado el programa Artemisa, iniciado con Trump, y ha seguido financiando los contratos del programa CLPS. Eso ha sorprendido a algunos científicos lunares, que están acostumbrados a que cambie la dirección del viento cada vez que toma posesión un nuevo presidente. «Es formidable que haya habido un cambio de administración y Artemisa continúe adelante», valora Fagan. «Está claro que existe una percepción de lo importante que es regresar a la Luna.»

El programa Apolo constituyó una demostración del poderío intelectual y geopolítico de Estados Unidos. Medio siglo más tarde, estas nuevas misiones pondrán de manifiesto el actual capitalismo subvencionado por el Gobierno, que compartirá el control (y el mérito) con los empresarios. Los científicos que solo buscan entender mejor nuestro satélite natural deberían obtener sus respuestas sin importar quién lance las naves. La Luna, tan silenciosa y premonitoria como siempre, no hará distinciones.

Rebecca Boyle es periodista científica. Su próximo libro, *Walking with the Moon: Uncovering the secrets it holds to our past and our future* (Random House), describirá la relación entre la Tierra y la Luna a lo largo de la historia.



EN NUESTRO ARCHIVO

¿Existió o no la carrera hacia la Luna? John M. Logsdon y Alain Dupas en *IyC*, agosto de 1994.
Destino: la Luna. Michael Belfiore en *IyC*, junio de 2012.
Investigación espacial de bajo coste. S. Alan Stern en *IyC*, junio de 2013.
La importancia de regresar a la Luna. Clive R. Neal en *IyC*, septiembre de 2016.
Pugna por la Luna. Adam Mann en *IyC*, julio de 2019.
Más de 50 años de misiones a la Luna. Set Reset en **www.investigacionyciencia.es**, 15 de julio de 2019.



EL ASTRONAUTA estadounidense Richard Arnold realiza una operación en el exterior de la Estación Espacial Internacional el 14 de junio de 2018, sobre todo para instalar cámaras. Se han establecido numerosos protocolos ante un accidente, pero no se pueden prever todos los escenarios.

MEDICINA ESPACIAL

CURAR EN EL ESPACIO

S. Thierry, M. Komorowski, A. Golemis y L. André-Boyet | La salud de los astronautas plantea innumerables desafíos para las futuras misiones a la Luna y a Marte, o para el turismo espacial. ¿Cómo pueden evitarse los riesgos médicos y debe actuarse en caso de fuerza mayor?

©NASA

El 24 de febrero de 1997, a bordo de la estación orbital rusa Mir se origina un incendio durante una operación de mantenimiento de un generador de oxígeno. Un cartucho de perclorato de litio empieza a arder. A más de 350 kilómetros de altitud y en ingravidez, la situación es crítica desde el principio. Flota por la estación un espeso humo con partículas de combustión y bolitas de metal fundido que expone a los astronautas al riesgo de quemaduras graves o pérdida del conocimiento por asfixia. Las llamas amenazan con perforar las paredes de la estación y despresurizar el habitáculo, lo que mataría rápidamente a sus ocupantes. La tripulación se pone de inmediato las máscaras respiratorias para protegerse del humo tóxico, activa los extintores y consigue controlar el fuego en pocos minutos bajo el estruendo de las alarmas. Solo hay que lamentar algunas lesiones leves. Lo peor se ha evitado milagrosamente. Este incidente crítico ilustra tres de los riesgos más temidos para la supervivencia de los astronautas en una estación espacial: el fuego, la despresurización y la contaminación de la atmósfera interior. Si un astronauta sufre una lesión grave, las numerosas limitaciones de los viajes espaciales dificultan en gran medida la prestación de atención médica avanzada durante la misión.

Al igual que los marinos que emprenden la vuelta al mundo en solitario, la asistencia y, sobre todo, la evacuación médica no siempre son posibles. Por lo tanto, es imprescindible prevenir los riesgos en lugar de padecer los daños, prever muy diversos escenarios y lograr que la tripulación sea lo más autónoma posible frente a distintas contingencias sanitarias. Aunque la órbita terrestre baja alberga desde hace más de veinte años la Estación Espacial Internacional (EEI), a la que se ha unido recientemente la estación china, las nuevas perspectivas de presencia humana exigen considerar de nuevo la gestión de los riesgos médicos. Los vuelos turísticos, ya sean orbitales o suborbitales, plantean la cuestión del rigor de los criterios médicos que deben aplicarse a los participantes. Todavía no se ha establecido el equilibrio correcto entre unos criterios demasiado estrictos (que reducirían el número de clientes potenciales) o demasiado amplios (con riesgo de que se agraven trastornos crónicos durante la travesía). Además, la conquista del llamado «espacio profundo», con la ocupación de la superficie lunar y la exploración de Marte, abre otros interrogantes sobre la capacidad de protección y de adaptación del ser humano en ese entorno hostil, por no hablar de las dificultades de la prestación de cuidados en régimen de plena autonomía.

EN SÍNTESIS

El espacio es un entorno hostil. Los astronautas están expuestos a los rayos cósmicos, al estrés, al cansancio y a la ingravidez, entre otros factores, los cuales influyen negativamente en el organismo.

Las agencias espaciales han desarrollado una estrategia triple: prevención, contramedidas y autonomía médica de los astronautas.

La aparición del turismo espacial y los planes de exploración de la Luna o de Marte acentúan aún más la necesidad de autonomía médica de los astronautas. Los equipos avanzados de diagnóstico y las simulaciones de laboratorio ofrecen algunas respuestas.

Un entorno de riesgo

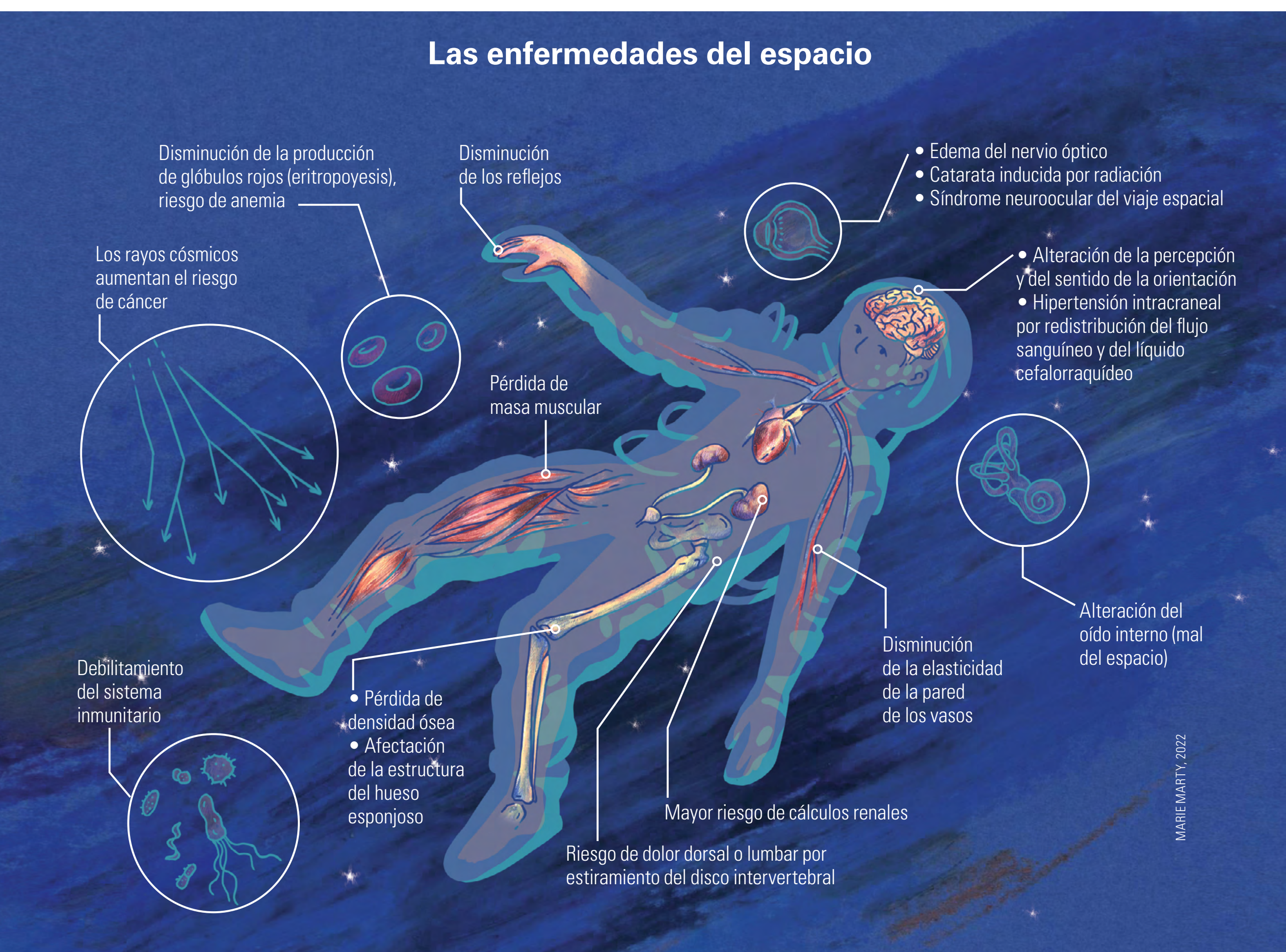
Pero incluso las actividades cotidianas a bordo de la estación pueden ser peligrosas. Igual que en un submarino, los astronautas pasan varios meses en un recinto confinado y ruidoso, rodeados de infinidad de cables eléctricos, paneles de control y sistemas de refrigeración que, en teoría, podrían provocar electrización, quemaduras o exposición a sustancias irritantes. Otra particularidad de este trabajo es que algunas operaciones de mantenimiento o de reparación de componentes (baterías, cables, antenas) requieren salir de la estación. Estas salidas, denominadas extravehiculares, son arriesgadas y físicamente agotadoras. Suelen durar varias horas y exigen un nivel de concentración muy elevado. Los trajes espaciales utilizados en estas misiones son auténticas miniestaciones individuales que contienen todo el equipo preciso para el soporte de las funciones vitales. En su interior, los astronautas se encuentran en una atmósfera hipobárica (0,3 bares), lo que mejora la flexibilidad del traje, necesaria para la movilidad y el manejo de herramientas. La transición entre la atmósfera de la estación y la atmósfera hipobárica del traje se controla y prepara en una esclusa de despresurización, con el fin de proteger a los astronautas del riesgo de enfermedad por descompresión, similar a la bien conocida de los buceadores. Por último, la amenaza de colisión

con la basura espacial o los micrometeoritos, que se desplazan a varios kilómetros por segundo, es considerable.

Otra limitación ambiental, y no la menos importante: la ingravidez. En la Tierra, podemos caminar, saltar, correr, mantener el equilibrio o ajustar nuestro gasto cardíaco al esfuerzo y a los cambios de posición gracias a nuestra fisiología, adaptada a la gravedad terrestre. Nuestros músculos, huesos, oído interno, bomba cardíaca y red vascular han evolucionado durante millones de años en presencia de esta fuerza. En cambio, a 400 kilómetros de altitud, los astronautas se hallan en caída libre. Cada sistema fisiológico del organismo intenta encontrar una nueva homeostasis, es decir, un nuevo punto de equilibrio funcional, pero estas adaptaciones tienen sus límites. La ausencia de cargas se convierte, de hecho, en una carga: el hueso pierde minerales y se debilita poco a poco, la reducción de las tensiones funcionales conduce así a una rápida desmineralización ósea, que aumenta el riesgo de fracturas y de formación de cálculos renales. Los músculos posturales se atrofian, las paredes de los vasos sanguíneos se engrosan. La agudeza visual puede verse afectada debido, entre otras causas, a la hipertensión intracraneal que acompaña a la redistribución del flujo sanguíneo hacia la mitad superior del cuerpo. La coordinación sensoriomotora se altera. Esta supresión de la gravedad da lugar a una serie de síntomas propios de la vejez o del reposo prolongado en cama, lo que predispone al inicio de determinados procesos patológicos y reduce la reserva fisiológica en caso de afecciones médicas o traumáticas. Incluso la regulación y la expresión de los genes se modifican, como puso de manifiesto el notable Estudio de los Gemelos, de la NASA.

Para proteger la salud de los astronautas en este entorno excepcional y alejado de los hospitales, las agencias espaciales y sus departamentos médicos han puesto en marcha una estrategia de reducción de riesgos basada en tres pilares: prevención, contramedidas y autonomía médica a bordo.

Entre las medidas preventivas, la selección drástica de sujetos jóvenes en excelente forma física y mental excluye ciertos riesgos de descompensación, es decir, el deterioro de un estado patológico crónico subyacente durante la misión (como epilepsia, asma o insuficien-



Caída libre permanente

En contra de lo que muchos creen, la Estación Espacial Internacional sí está sometida a la gravedad terrestre (su intensidad a 400 kilómetros de altitud es aproximadamente el 88 por ciento de la del nivel del mar). Pero la estación no se estrella gracias a su elevada velocidad orbital (28.000 kilómetros por hora), que anula el efecto de la gravedad. Se halla pues, junto con sus ocupantes, en permanente caída libre, dando la vuelta a la Tierra en 90 minutos. Si bien es espectacular ver a los astronautas flotar en la estación, la ingravidez es un verdadero problema para su salud.



ISTOCK/GETTY IMAGES

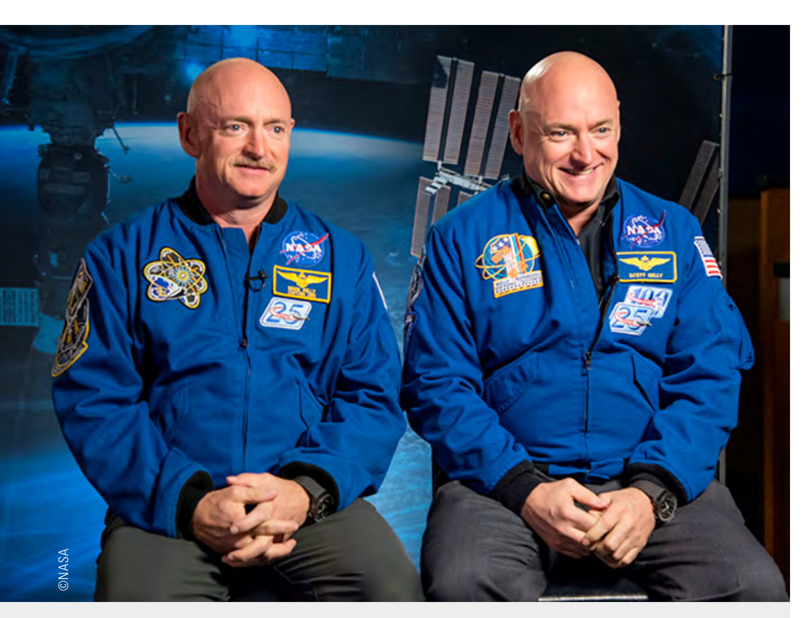
cia cardíaca). Tras el reclutamiento, un equipo médico sigue a los astronautas durante toda la fase de preparación que precede a su misión. Los protocolos están estandarizados e incluyen pruebas de esfuerzo, control de la densidad ósea y exámenes oftalmológicos y audiométricos. Garantizan la ausencia de procesos patológicos antes de la partida y servirán como datos de referencia para la vigilancia posterior al vuelo. El confinamiento de 14 días impuesto antes del despegue reduce el riesgo de introducir en la estación una enfermedad infecciosa en fase de incubación. Todo síntoma sospechoso dará lugar a la exclusión del astronauta como medida de precaución para su salud y la de sus compañeros. Un caso famoso es el de Ken Mattingly, retirado de la misión Apolo 13 por sospecha de rubeola unos días antes del lanzamiento.

La evacuación a la Tierra puede ser arriesgada para el herido

Otro ejemplo de prevención es la estrecha vigilancia del entorno de la EEI a través del Sistema de Salud Ambiental (EHS). Este dispositivo, compuesto por una multitud de aparatos de medición, detecta la posible contaminación microbiológica del agua o de las superficies de la estación. También se controla la calidad de la atmósfera de la Estación, para advertir de la presencia de gases tóxicos como el formaldehído o el monóxido de carbono. Por último, los dosímetros permiten vigilar el riesgo de radiación, como ocurre con los trabajadores terrestres expuestos a radiaciones ionizantes en las centrales nucleares o en los servicios de radiología médica.

Estas medidas preventivas se complementan con las contramedidas. Este término define el conjunto de acciones emprendidas para limitar el impacto fisiológico o psicológico de una variable no controlable, como la ingravidez o el confinamiento. Por ejemplo, para hacer frente al desacondicionamiento muscular provocado por los viajes espaciales, los astronautas tienen que hacer ejercicio durante dos horas y media al día. Así, la EEI está equipada con diferentes aparatos: la cinta de correr con arnés, el cicloergómetro (bicicleta estática) o el aparato de entrenamiento resistivo avanzado (ARED), una máquina de musculación adaptada a la ingravidez. Se están estudiando otras contramedidas nutricionales, como la ingesta de polifenoles, para mantener la masa muscular durante las misiones espaciales.

Estas dos primeras líneas de protección (prevención y contramedidas) son eficaces y representan la mayor parte de la estrategia de gestión de riesgos para una misión en la órbita terrestre baja. Por desgracia, en este entorno peligroso, nunca puede descartarse por completo la posibilidad de sufrir lesiones o enfermedades. Algunas proyecciones estadísticas estiman que el riesgo de que suceda un incidente médico o traumático grave a bordo de una estación orbital durante una misión de seis meses se encuentra entre el 1 y el 17 por ciento por persona. La exploración espacial tiene un largo historial de episodios médicos. Antes de la puesta en funcionamiento de la EEI, entre 1961 y 1999, las publicaciones recogen 17 acontecimientos médicos graves a bordo de una nave espacial en órbita, cuatro de los cuales requirieron la evacuación a la Tierra. Trastornos del ritmo cardíaco, infección urinaria grave o cefaleas resistentes a los analgésicos llevaron a los responsables del vuelo a acortar la misión en lugar


©NASA

Un hermano en el espacio, el otro en tierra

Scott y Mark Kelly, gemelos homocigóticos (con la misma dotación genética), participaron en el Estudio de Gemelos de la NASA. Entre el 27 de marzo de 2015 y el 1 de marzo de 2016, Scott pasó 340 días en la Estación Espacial Internacional mientras Mark permanecía en la Tierra. El análisis comparativo de los hermanos permitió observar los efectos de un viaje de larga duración en el espacio. Numerosas funciones biológicas se alteraron durante la misión, aunque la mayoría volvió a la normalidad tras el regreso a la Tierra: regulación y expresión genética y epigenética, longitud de los telómeros, masa corporal (pérdida del 7 por ciento), composición de la microbiota intestinal. Otras funciones como el sistema inmunitario y el rendimiento cognitivo se vieron afectadas por el estrés de la vuelta al planeta. Algunos de los cambios persistían seis meses después del fin de la misión.

de arriesgarse a una realizar una intervención dentro de la nave.

La tercera línea de defensa corresponde a la dotación de capacidades operativas médicas y quirúrgicas en el seno de la EEI, para que la tripulación sea lo más autosuficiente posible ante diversas contingencias sanitarias. Este es el papel del Sistema de Mantenimiento de la Salud, que reúne a bordo de la EEI más de 190 productos farmacéuticos, organizados en botiquines adaptados al grado de urgencia y dirigidos a los problemas con mayor probabilidad de incidencia. Por ejemplo, las dolencias menores que no presentan riesgo de agravamiento secundario se tratan fácilmente con el botiquín ambulatorio, que está bastante bien provisto para las pequeñas afecciones cotidianas (mareo espacial y náuseas, estreñimiento, pequeñas quemaduras, etcétera.). La estación está equipada con ecógrafos, cuyas imágenes son de gran ayuda para el diagnóstico de muchas dolencias.

Bacterias agresivas

Los astronautas también disponen de una amplia gama de antibióticos para tratar, por ejemplo, infecciones bacterianas pulmonares o urinarias. Sin embargo, en el espacio, el riesgo de infección se ve acentuado por una combinación de factores. El entorno cerrado y de confinamiento facilita la transmisión de patógenos de una persona a otra. Las defensas inmunitarias de los astronautas se hallan debilitadas, probablemente debido al estrés de la misión, la alteración del sueño y de los ritmos circadianos, el entorno de radiaciones y una alimentación con aportes nutricionales limitados. Por último, diversos estudios, como el realizado en 2013 por Elisabeth Grohmann, de la Universidad Técnica de Berlín, o el de 2020 llevado a cabo por Sharmila Bhattacharya, de la NASA, indican que las condiciones de la estación espacial (ambiente cerrado, artificial e hipobárico) serían propicias para la aparición de bacterias más resistentes al tratamiento (por la formación de biopelículas bacterianas que obstaculizan la penetración y la eficacia de los antibióticos), y a veces incluso más virulentas.

Por otra parte, el entorno espacial radiativo acelera la degradación de los principios activos de los medicamentos, lo que puede volverlos ineficaces a largo plazo y plantea problemas de caducidad en los vuelos de larga duración, sobre todo en los encaminados a Marte, en los que es imposible reabastecerse durante la misión. Algunos equipos trabajan en el diseño de envases que aíslen los medicamentos de los rayos cósmicos. Otros, como Karen McDonald, de la Universidad de California en Davis, pretenden dotar a la estación de la capacidad de producción de medicamentos *in situ*... ¡gracias al cultivo de lechugas modificadas genéticamente!

Finalmente, como último recurso en caso de accidente grave, el botiquín de soporte vital

avanzado está equipado para responder a los primeros momentos de una urgencia médica, con desfibrilador, material para intubación traqueal, un respirador básico, así como fármacos para las primeras fases de reanimación, como adrenalina o atropina.

Manejar estos materiales y procedimientos de asistencia requiere habilidad y precaución. Cuando un astronauta procede de la profesión médica, se le designa naturalmente como referente de la atención a bordo. Pero la mayoría de las veces, esta responsabilidad recae en un astronauta que no es médico y que habrá recibido unas diez horas de formación en primeros auxilios. Denominado oficial médico de la tripulación (CMO), debe ser capaz de realizar procedimientos técnicos muy variados, como suturas, intervenciones dentales o sondaje urinario.

Además, los astronautas cuentan con la vigilancia y la asistencia desde tierra de los médicos asignados a los vuelos, que son especialistas en medicina aeroespacial. Desde los centros de control terrestres, analizan continuamente los parámetros fisiológicos de los astronautas y, si es necesario, les proporcionan atención a distancia. El seguimiento médico y psicológico constante les permite dar consejos de salud y manejar las dolencias menores con la ayuda de la farmacia de a bordo.

Una cifra ilustra el éxito y la solidez de las estrategias de control de riesgos médicos en la órbita baja de la Tierra: no ha sido necesaria ninguna evacuación médica de la EEI desde que comenzó a habitarse en 2000. Estos datos contradicen por ahora las proyecciones estadísticas, inicialmente más pesimistas.

Dicho logro no debe ocultar que cada línea de defensa (prevención, contramedidas y autonomía) tiene sus límites. Algunos ejemplos de las vulnerabilidades técnicas y estratégicas relativas a la autonomía médica en la EEI dejan entrever los inmensos retos y dilemas médicos que plantea la perspectiva de misiones más lejanas, como una expedición a Marte.

En una estación diseñada para seis personas, es imposible disponer de un sistema técnico completo de atención sanitaria, debido a cuestiones de carga útil, volumen, coste, habilidades y recursos humanos. La EEI no está equipada para cuidados intensivos avanzados y prolongados. Por lo tanto, hay que hacer concesiones y centrar la prestación de asistencia en las enfermedades con mayor probabilidad de incidencia. Estas



A BORDO de la Estación Espacial Internacional, todos los astronautas tienen que practicar 2,5 horas de deporte al día, como Thomas Pesquet, aquí en el cicloergómetro.

©NASA

dolencias pueden ser ordinarias, sobrevenidas espontáneamente durante el vuelo y sin relación con la misión (como un absceso dental), o circunstanciales, es decir, favorecidas o causadas por la exposición a uno de los muchos factores condicionantes del entorno espacial. Sin embargo, en caso de accidente grave, las opciones de tratamiento se verían desbordadas enseguida. La estación no posee ni produce hemoderivados lábiles (unidades de sangre para transfusiones, por ejemplo) ni material quirúrgico complejo para efectuar una intervención digestiva o vascular urgente, y no cuenta con el personal necesario para manejar el elevado número de tareas críticas necesarias para atender a un

Procedimientos adaptados al entorno espacial: el ejemplo de la intubación traqueal



© CNES/NOVESPACE

Práctica de intubación en un maniquí con la técnica inversa, o «método del piolet». La ingravidez exige cambios en el planteamiento ergonómico de muchos procedimientos médicos de urgencia.

La intubación traqueal es un método de urgencia para mantener y controlar el aporte de oxígeno (en cuanto a volumen, frecuencia y fracción inspirada) de un paciente en estado crítico. Este procedimiento invasivo está indicado en los pacientes que tienen abolido el control ventilatorio del tronco cerebral (por ejemplo, tras una pérdida del conocimiento, una parada cardíaca o un traumatismo craneoencefálico grave). También puede ser necesario cuando los pulmones ya no desempeñan correctamente su función de intercambio de gases, debido, por ejemplo, a un daño en la membrana alveolocapilar pulmonar. Les sucede a algunos pacientes con COVID-19 y les podría haber ocurrido a los astronautas de la estación Mir durante el incendio de 1997.

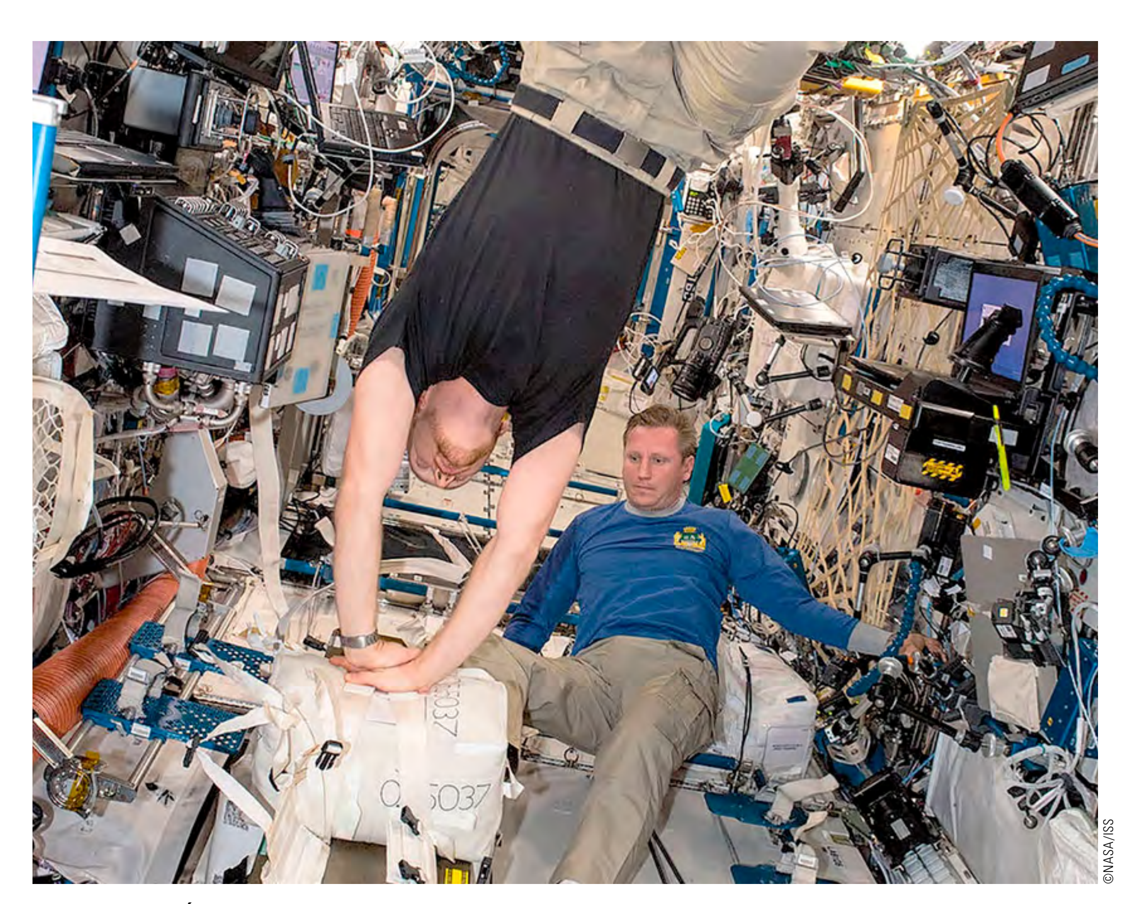
La técnica, ya arriesgada en condiciones normales, es aún más compleja en el espacio. Quien la practica sufre los efectos adversos de la ingravidez, como la dificultad para estabilizarse o la alteración de los sistemas sensoriomotor y vestibular (oído interno). ¿Cómo puede adaptarse el protocolo a este entorno? Gracias a las campañas de vuelo parabólico del Centro Nacional de Estudios Espaciales de Francia (CNES), nuestro equipo de investigación estudió la intubación traqueal en «condiciones espaciales» a bordo del Airbus A310 Zero-G, operado por Novespace. Este avión-laboratorio sumerge a sus pasajeros en un estado de ingravidez similar al de la EEI, por medio de un sistema de pilotaje único que sitúa la aeronave en una trayectoria parabólica.

Cada vuelo ofrece a los científicos 30 parábolas, con 22 segundos de ingravidez cada una. Durante los vuelos, estudiamos en un maniquí de gran fidelidad nuevos equipos de intubación asistida por vídeo, previamente validados en la medicina terrestre. Estos «videolaringoscopios» permiten observar las cuerdas vocales en la pantalla, de modo que se logra un mejor control del acto a pesar de la flotación del operador. El experimento demostró una mejora del rendimiento con respecto a los sistemas de intubación que actualmente se encuentran a bordo de la EEI, lo que podría validar su presencia en los futuros botiquines espaciales de urgencias. Con todo, aunque nuestros datos acreditan que estas nuevas herramientas facilitan la intubación en ingravidez, persisten aún muchas dificultades para gestionar de forma integral una urgencia respiratoria a escala espacial. Las complicaciones derivadas de la intubación son potencialmente graves e incluso mortales, como no detectar que el tubo se ha colocado por error en el esófago y no en la tráquea. Este método también suele requerir la sedación del paciente con fármacos peligrosos de manejar si no se cuenta con la experiencia o el seguimiento adecuados. Además, aunque la intubación sea satisfactoria, el respirador artificial, conectado al tubo, debe ajustarse correctamente para suministrar al paciente los volúmenes y presiones respiratorias correctos, ajustes que son en sí mismos una fuente de accidentes. La práctica de esta intervención en una estación espacial reúne todos los factores de riesgo de fracaso y, por tanto, plantea dudas legítimas sobre su empleo en un entorno aislado, sin mencionar los problemas de suministro de oxígeno y medicamentos necesarios para mantener la función respiratoria. El debate en el ámbito de la medicina espacial sigue abierto.

herido grave. Entre las vías de investigación para reforzar la autonomía médica en el entorno espacial, la NASA ha probado un generador de suero fisiológico (llamado IVGEN) en la EEI. Esta solución de primera necesidad permite preparar medicamentos e hidratar por vía intravenosa a los pacientes graves.

Otra dificultad es la separación geográfica entre la tripulación aislada en el espacio y un experto médico en tierra. Tal disposición aumenta la complejidad de la asistencia médica por múltiples razones. Las pérdidas frecuentes de señal suelen interrumpir el enlace de audio y vídeo entre la Tierra y la EEI, lo que entorpece la transmisión de información. Ante una situación médica crítica a bordo, la evaluación del caso podría ser confusa en ambos lados, ya que la urgencia es una fuente de errores de interpretación y de sesgos cognitivos, como demuestra el difícil ejercicio de la priorización en el seno de los Servicios de Urgencias. La diferencia de lengua materna entre los hablantes puede dificultar la comunicación. En el caso de un viaje a Marte, esta opción de colaboración a distancia se vería sumamente perjudicada, llegando incluso a resultar inútil: la latencia de las comunicaciones por radio sería tan elevada (a veces más de veinte minutos en cada sentido) que no se podría interactuar en tiempo real durante una emergencia. Algunos equipos de investigación, entre ellos el nuestro (con el Centro Europeo de Realidad Virtual de Brest), trabajan en proyectos de ayuda a la toma de decisiones médicas y a la percepción del riesgo (por parte de los astronautas) con diversas técnicas, como la inteligencia artificial, los programas conversacionales (o chatbots) y la realidad aumentada.

Pero volvamos a la EEI. ¿Podríamos optar simplemente por una evacuación médica ante un síntoma preocupante? Al fin y al cabo, las cápsulas Soyuz o Crew Dragon, acopladas a la estación, permiten regresar a la Tierra en pocas



©NASA/ISS

MASAJE CARDÍACO EN EL ESPACIO. Para ponerlo en práctica, se han estudiado y comparado diferentes métodos, que buscan mantener el contacto entre el prestador de asistencia y el paciente. En algunos se sujeta al enfermo con las piernas, mientras que en otros se utilizan correas para amarrarse al suelo. El que parece funcionar mejor es en posición vertical invertida, como se muestra en la foto.

horas. Se calcula que el tiempo máximo entre la decisión de evacuación y el ingreso en el hospital sería de unas treinta horas. De hecho, la tripulación de una estación orbital está más cerca de un hospital moderno que algunos marineros o que los científicos que pasan el invierno en la Antártida. Para estos últimos, la evacuación llega a tardar varios días o incluso resulta imposible debido a las condiciones meteorológicas.

Pero esta ventaja se ve contrarrestada por numerosas dificultades que limitan la opción de evacuación médica. Por ejemplo, es imposible por ahora prever un traslado de astronautas que requieran cuidados críticos desde la EEI hasta la Tierra, a semejanza de las evacuaciones interhospitalarias sacadas a la luz durante la pandemia de SARS-CoV-2. Este tipo de traslado de pacientes intubados, ventilados y sedados requiere una importante logística en lo que se refiere a equipo terapéutico (infusiones, bombas de jeringa, respirador conectado al paciente por un tubo endotraqueal), monitorización y personal. Sencillamente, no es posible que quepa tanto material asistencial en una cápsula tan estrecha.

La presencia humana en el espacio profundo supone un reto mucho más complejo que el que plantea en las estaciones orbitales

En la EEI, la decisión de una posible evacuación médica se enfrenta, por tanto, a dos escollos estratégicos. El primero sería evacuar innecesariamente, con un alto coste, una dolencia benigna que se podría haber tratado con la farmacia de a bordo. Por el contrario, sería catastrófico subestimar la gravedad inicial o potencial (si la evolución fuera desfavorable) de una afección, perder el momento óptimo para evacuar y luego quedarse sin opciones de tratamiento dentro de la estación.

Un incidente acaecido hace unos años en la EEI resume tales dificultades. Un miembro de la tripulación participaba en un estudio ecográfico de la pared de los vasos sanguíneos. Durante un examen en el contexto de este experimento, el equipo le descubrió fortuitamente una trombosis de la vena yugular interna. La ingravidez es un factor de riesgo de la formación de coágulos sanguíneos, ya que el estancamiento del flujo sanguíneo venoso fomenta la hipercoagulabilidad, como ocurre durante el reposo prolongado en cama. Esta trombosis era problemática. Aunque el astronauta no mostraba ningún síntoma de mala tolerancia, el eventual desprendimiento de ese coágulo de la pared del vaso habría provocado con gran probabilidad una embolia pulmonar grave, con la consiguiente insuficiencia cardíaca potencialmente mortal.

Los médicos de vuelo se enfrentaban a una situación delicada. ¿Era necesario optar por la estrategia de «cargar y correr» (*scoop and run*), consistente en evacuar a un paciente con riesgo de descompensación lo más rápido posible a un centro de referencia, con escaso tratamiento corrector durante la asistencia? ¿O había que elegir la estrategia inversa, «quedarse y jugar» *stay and play* (literalmente,), más intervencionista, que acerca los recursos médicos al paciente para estabilizarlo antes de un hipotético traslado?

En el caso presentado, se tomó la decisión de mantener al astronauta en vuelo: se inició a bordo un tratamiento anticoagulante con la pequeña reserva de la farmacia, para frenar la extensión del coágulo. Gracias a los reabastecimientos de la estación mediante la nave de carga, el tratamiento se mantuvo hasta el final de la misión, y no se detectaron complicaciones durante el control ecográfico periódico. Así pues, los médicos de vuelo optaron por un compromiso entre las dos estrategias prehospitalarias. Sin embargo, a mayor lejanía de la Tierra, el método *stay and play* acabará siendo la única opción posible. El suministro de medicamentos o el refuerzo humano resultarán complicados, si no imposibles, en el caso de una misión en suelo marciano.

Ingravidez simulada

La medicina espacial aún es un campo de investigación muy abierto, cuya problemática evoluciona con la perspectiva de las misiones lejanas o la apertura al turismo. Para ampliar nuestros conocimientos en este ámbito, la EEI sigue siendo, sin duda, un laboratorio esencial dedicado a la ciencia de la ingravidez. No obs-

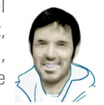
tante, otros medios permiten simular (al menos en parte) estas condiciones tan particulares: los vuelos parabólicos en avión o los estudios de inmersión en seco. Estos últimos destacan en el Instituto de Medicina y Fisiología Espaciales de Toulouse, un centro de referencia en fisiología y medicina aeroespacial. La inmersión en seco reproduce los efectos de la ingravidez al sumergir a un sujeto (aislado del agua por una lona impermeable) en una gran bañera. Esta táctica imita los efectos de la ingravidez con la eliminación de los puntos de apoyo, para estudiar, entre otros, los variados efectos musculares o cardíacos asociados.

La medicina terrestre también se beneficia de este campo de investigación. El laboratorio Comete, de la Universidad de Caen, o la unidad de investigación CAPS (cognición, acción y plasticidad sensoriomotora) de la Universidad de Borgoña, por citar solo dos casos, orientan parte de sus investigaciones a la medicina espacial. Ciertamente, la discapacidad motora, el reposo prolongado en el hospital o las enfermedades del oído interno, por ejemplo, presentan analogías con las modificaciones fisiológicas inducidas por la ausencia de gravedad.

El campo de la telemedicina se beneficia asimismo de la actividad espacial. A título de ejemplo, en 2017, durante la misión Proxima, el astronauta Thomas Pesquet participó en la puesta en marcha de un ecógrafo operado a distancia (denominado Echo). En la actualidad, un médico puede teledirigir desde tierra una sonda de ultrasonidos presente en la EEI. Así, gracias a esta técnica, un experto interviene directamente, mientras el paciente permanece a distancia, y controla en tiempo real la calidad de las imágenes recogidas, lo que mejora el rendimiento diagnóstico del examen. Citemos también la ropa interior desarrollada por la Agencia Espacial Canadiense, llamada «biomonitor», que registra las constantes vitales del astronauta sin ser invasiva. Las nuevas tecnologías, como la realidad aumentada, la inteligencia artificial para respaldar la toma de decisiones o la impresión en 3D de material médico, también ofrecen perspectivas interesantes para la asistencia sanitaria en entornos aislados.

Hasta ahora, la estrecha colaboración entre programadores de misiones, ingenieros, investigadores, instructores de astronautas y médicos espaciales ha permitido reducir los riesgos médicos en las estaciones orbitales y establecer altos niveles de seguridad para los astronautas. La presencia humana en el espacio profundo supone un reto mucho más complejo. A las cuestiones técnicas se sumarán invariablemente aspectos éticos en caso de enfermedad grave que requiera más recursos de los disponibles. En una pequeña estación en la Luna o en Marte donde el reabastecimiento, los refuerzos o la evacuación inmediata no fueran factibles, la probabilidad de supervivencia sería ínfima. No obstante, los avances técnicos tal vez aporten soluciones para acrecentar la seguridad en estas misiones que desafían los límites de la exploración. Ambiciosos proyectos de investigación llegan incluso a contemplar la posibilidad de la hibernación humana.

Séamus Thierry es médico anestesista y reanimador del Grupo Hospitalario del Sur de Bretaña, en Lorient, e investigador asociado del Laboratorio de Psicología, Cognición, Comportamiento y Comunicación de la Universidad del Sur de Bretaña.



Matthieu Komorowski es médico anestesista y reanimador del Hospital Charing Cross, en Londres, y profesor del Colegio Imperial de Londres.



Adrianos Golemis es médico de astronautas de la Agencia Espacial Europea, en Colonia, y miembro del Instituto Medes de Medicina y Fisiología Espaciales, en Toulouse.



Laura André-Boyet es instructora de astronautas de la Agencia Espacial Europea, en Colonia, adscrita al Centro de Formación de Aviación de Lufthansa.



PARA SABER MÁS

Cardiopulmonary resuscitation (CPR) during spaceflight - a guideline for CPR in microgravity from the German Society of Aerospace Medicine (DGLRM) and the European Society of Aerospace Medicine Space Medicine Group (ESAM-SMG). Jochen Hinkelbein et al. en *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*, vol. 28, artículo n.º 108, noviembre de 2020.

On the challenges of anesthesia and surgery during interplanetary spaceflight. M. Komorowski et al. en *Anesthesiology*, vol. 135, págs. 155-163, julio de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Efectos de la ingravidez sobre el cuerpo humano. Ronald J. White en *IyC*, noviembre de 1998.

La humanidad en el espacio. Cameron M. Smith en *IyC*, marzo de 2013.

El peligro oculto en el espacio profundo. Charles L. Limoli en *IyC*, abril de 2017.

NI LOS HOMBRES SON DE MARTE NI LAS MUJERES DE VENUS

Spencer Greenberg y Holly Muir | La mayoría de las personalidades aúnan características atribuidas a uno u otro género

MOLLY MAGNELL



¿Cuán distintos somos en realidad los hombres y las mujeres? Hace unos treinta años, muchos daban por sentado que existían grandes diferencias de personalidad. Sirvan de indicación las guías para encontrar pareja o los consejos recogidos en el libro *Los hombres son de Marte, las mujeres son de Venus*. Hoy, en cambio, ciertos colectivos se oponen a la idea del género binario, que sitúa a hombres y mujeres en categorías distintas. (En el contexto de este artículo, «género», expresado en términos de «varón», «mujer» o «persona no binaria», se aplica básicamente a los componentes culturales y sociales, mientras que «sexo», descrito a veces con adjetivos como «masculino», «femenino» e «intersexual», designa una combinación de características biológicas.)

En el ámbito científico también se están analizando con mayor profundidad el género, el sexo y la personalidad. Por un lado, se debate en qué medida se diferencia la personalidad de hombres y mujeres cisgénero (las personas que se describen como hombres o como mujeres y afirman que esa identidad de género coincide con el sexo que se les asignó al nacer). La respuesta depende de cómo midan los psicólogos las características individuales.

Por ejemplo, en Estados Unidos, un estudio con más de 300.000 personas que se identificaron a sí mismas como hombres o como mujeres analizó rasgos de personalidad amplios, como la extraversión y la amabilidad, así como aspectos más específicos de estos rasgos, como una conversación y un trato afables o la tendencia a actuar de manera altruista. En esa muestra, las diferencias entre los participantes masculinos y femeninos fueron moderadas en los rasgos amplios pero, en la mayoría de los casos, más dilatadas en el nivel específico. En concreto, los hombres y las mujeres del estudio fueron en general igual de extravertidos (un rasgo amplio). Sin embargo, al examinar los aspectos específicos de la extraversión, se descubrió que, en promedio, ellos buscaban situaciones emocionantes con mayor frecuencia que ellas. Y las participantes demostraron mayores niveles de actividad que ellos.

Con el fin de evaluar el conjunto más completo de rasgos de personalidad hasta la fecha, nuestro proyecto, ClearerThinking.org, llevó a cabo una serie de 15 estudios y diversos análisis con más de 15.000 personas. Estos análisis se limitan a hombres y mujeres cisgénero: el 98 por ciento de los participantes se identificaron como tales, por lo que no contamos con datos suficientes para valorar los rasgos de personalidad de las personas no binarias y transgénero. Los datos revelaron 18 rasgos concretos, referidos por los participantes, que diferían entre estos hombres y mujeres. A continuación, diseñamos un algoritmo que predeciría el género de una persona en función de sus propias puntuaciones en dichos rasgos, que acertó el 78 por ciento de las veces. Pese a esa elevada precisión, dista de ser perfecto, lo que pone de manifiesto lo difícil que es predecir el género de un individuo a partir de su combinación de rasgos. Por último, adaptamos el cuestionario del estudio, en el que las personas calificaban su grado de acuerdo con afirmaciones como «Me río a carcajadas» y «Me preocupo con frecuencia», a una evaluación interactiva en línea.

En el proceso de elaboración de las preguntas destinadas a nuestros estudios, emprendimos una extensa investigación que abarcó el examen de grandes proyectos sobre personalidad, una revisión de la bibliografía especializada y colaboraciones abiertas. En total, examinamos las diferencias entre los géneros con más de 600 preguntas sobre personalidad, y determinamos los 18 rasgos que mostraban la mayor variación entre los hombres y las mujeres de nuestra muestra que se reconocieron como tales. Entre esos rasgos figuraban no solo las características generales tan usadas en la investigación psicológica, como la extraversión y la amabilidad, sino también pautas más específicas de pensamiento y comportamiento, como la frecuencia con que

EN SÍNTESIS

En promedio, hombres y mujeres muestran diferencias a lo sumo moderadas en la comunicación de su personalidad, aunque la práctica totalidad presenta una mezcla de rasgos más frecuentes en los hombres y más frecuentes en las mujeres.

Según el estudio presentado, la principal diferencia entre ambos sexos reside en la preocupación que suscita la actividad sexual, aunque con matices notables.

¿Es posible averiguar el sexo de una persona a partir de su personalidad? Los algoritmos están cada vez más cerca de ese objetivo.

un individuo asume riesgos o el grado de atención que presta a la estética. Además, verificamos nuestras conclusiones mediante un estudio final en que se replicaron las principales observaciones. En definitiva, no hallamos diferencias notables de personalidad entre los hombres y las mujeres cisgénero, en ningún rasgo, pero sí diferencias pequeñas y moderadas en los 18 rasgos de la personalidad.

Si intenta adivinar la personalidad de alguien por su género, lo más probable es que se equivoque

La mayor de esas disparidades fue la medida en que las personas cisgénero pensaban en la actividad sexual, que se evaluó preguntándoles por su grado de acuerdo con la afirmación «A menudo tengo pensamientos de carácter sexual cuando conozco a una persona atractiva» y de desacuerdo con la afirmación «No pienso con frecuencia en el sexo». (Aunque esta característica de «centrado en el sexo» no se asocia a los grandes rasgos de personalidad que se estudian habitualmente en psicología, encaja en el concepto de rasgo de personalidad por ser una tendencia del pensamiento, los sentimientos o la conducta. También se relaciona con lo que se denomina «preocupación sexual».) Determinamos que el género podría explicar alrededor del 18 por ciento de la variación en el grado en que las personas se centran en el sexo. La puntuación media de esta característica fue mayor en los hombres que en las mujeres, si bien muchas tuvieron una puntuación media más elevada que la mayoría de los varones. En otras palabras, los individuos eran muy variados, aunque, como grupo, los hombres tendieron a diferir de las mujeres.

Hombres y mujeres mostraron un notable grado de coincidencia en todos los rasgos. Ahora bien, en los extremos de la curva, donde la gente estaba muy de acuerdo o muy en desacuerdo con las preguntas planteadas, surgieron diferencias más acusadas. A título de ejemplo, en ellos y ellas la falta de compasión resultó infrecuente, pero era mucho más probable que las pocas personas que reconocían ser poco compasivas fueran hombres. Este resultado concuerda con el hecho de que el trastorno de la personalidad antisocial, que suele comportar falta de remordimiento o de empatía, es más frecuente en el varón que en la mujer.

¿Existe entonces una «personalidad de hombre» y una «personalidad de mujer»? Curiosamente, casi todos los participantes del estudio poseían una mezcla de rasgos «más frecuentes en los hombres» y «más frecuentes en las mujeres». Para cualquier rasgo dado, una mujer se aproximaba más a la media general de las mujeres que a la media general de los hombres solo el 61 por ciento de las veces. Y un hombre se aproximaba más a la media de los hombres que a la media de las mujeres solo el 57 por ciento de las veces. Solo alrededor del 1 por ciento de los hombres y del 1 por ciento de las mujeres tenían rasgos de personalidad casi en su totalidad «observados con más frecuencia en los hombres» u «observados con más frecuencia en las mujeres».

Para examinar con qué precisión es posible predecir el género a partir de la personalidad, elaboramos un sencillo algoritmo de aprendizaje automático (un programa informático que buscaba patrones en los datos para averiguar qué rasgos de personalidad se asocian a ser hombre cis o mujer cis). Entrenamos el algoritmo con los resultados de participantes anteriores del estudio y luego le presentamos los rasgos de personalidad de otros participantes nuevos para ver si podía predecir bien su género. Con el rasgo más predictivo, el interés por el sexo, el algoritmo pudo predecir correctamente el género de la persona el 69 por ciento de las veces. Quizá pueda parecer un resultado impresionante, pero la predicción dista de ser perfecta, pues algunas mujeres piensan mucho más en el sexo que el hombre promedio.

La precisión del algoritmo se elevó hasta el 78 por ciento cuando se le permitió incorporar todas las diferencias de personalidad a la vez. Pese a la gran mejora, la predicción del algoritmo fallaba con el 22 por ciento restante de las personas. Cuando planteamos nuestro cuestionario al público, la precisión descendió levemente al 74 por ciento, aunque siguió siendo mucho más certero que la persona promedio: presentamos a

otro grupo de participantes una serie de rasgos de personalidad que, les explicamos, pertenecían a individuos concretos, y les pedimos que predijeran el género de tales personas en función de los rasgos. Acertaron el 58 por ciento de las veces, poco mejor que lanzando una moneda al aire. Si lo desea, el lector puede responder el cuestionario *Gender Continuum Test* en nuestro sitio web y comprobar si el algoritmo predice su género.

Creemos que nuestros resultados arrojan nueva luz sobre la magnitud de las diferencias de personalidad entre géneros, con algunas salvedades importantes. En primer lugar, todos los participantes del estudio eran estadounidenses, por lo que, dada la influencia que los factores culturales tienen en la personalidad y en el género, seríamos reacios a extrapolar las conclusiones a otras poblaciones. En segundo lugar, el estudio no esclarece las causas de las diferencias de personalidad, en particular, en qué medida obedecen al medio ambiente y a la cultura o la biología. En tercer lugar, como ya hemos señalado, no contamos con datos suficientes para referirnos a las personas transgénero, intersexuales o no binarias. Esperamos que futuras investigaciones exploren estas y otras dimensiones del debate sobre la personalidad, el sexo y el género.

Por el momento, nuestro estudio recuerda que, por término medio, los hombres y las mujeres cisgénero manifiestan diferencias pequeñas o moderadas al comunicar su personalidad, pero casi todos presentan una mezcla de rasgos que resultan ser más frecuentes en los hombres y más frecuentes en las mujeres. Si intenta adivinar la personalidad de alguien por su género, lo más probable es que se equivoque.

Spencer Greenberg es matemático y fundador de ClearerThinking.org.



Holly Muir es investigadora en ClearerThinking.org.



EN NUESTRO ARCHIVO

Diferencias por razón de sexo. Jen Christiansen y Amanda Hobbs en *IyC*, diciembre de 2014.

Más allá de XX y XY. Amanda Montañez en *IyC*, noviembre de 2017.

Hombres promiscuos, mujeres castas y otros mitos. Cordelia Fine y Mark A. Elgar en *IyC* noviembre de 2017.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Javier Grande Bardanca, Yvonne Buchholz

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307, 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

PRODUCCIÓN

InboundCycle
Plaza Francesc Macià, 8-9, 7B
08029 Barcelona (España)
Teléfono 936 116 054

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

ASESORAMIENTO Y TRADUCCIÓN:

Andrés Martínez: *Apuntes, Ni los hombres son de Marte ni las mujeres de Venus* (ed.)*, Completar las lagunas del microbioma humano* y *Mareas microbianas tóxicas;* **José Óscar Sendín:** *Apuntes;* **Anna Ferran:** *El engaño de* Toxoplasma*;* **Juan Pedro Adrados:** *La nueva carrera hacia la Luna;* **Ana Mozo:** *Curar en el espacio* y *Ni los hombres son de Marte ni las mujeres de Venus* (trad.)*;* **Xavier Roqué:** *Territorios sumergidos;* **J. Vilardell:** *Un canal de sentido único;* **Miguel A. Vázquez Mozo:** *Un misterio matemático en el corazón de la física;* **Javier Grande:** *Los macrodatos transforman el fútbol.*

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF
Laura Helmuth

PRESIDENT
Kimberly Lau

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:
1 año 75€ / 2 años 140€

La suscripción incluye el acceso completo a la hemeroteca digital (todos los números publicados desde 1976).

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

Copyright © 2022 Scientific American Inc., 1 New York Plaza, New York, NY 10004-1562.

Copyright © 2022 Prensa Científica S.A. Valencia, 307, 3.º 2.ª, 08009 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

TERRITORIOS SUMERGIDOS

La exploración del subsuelo marino en la historia reciente

Beatriz Martínez-Rius

No pensamos en el subsuelo marino cuando enviamos un correo electrónico, recibimos una llamada o viajamos en avión. Sin embargo, este espacio y sus recursos son esenciales para llevar a cabo todas estas actividades: el 99 por ciento de las telecomunicaciones mundiales, incluidas Internet y la telefonía, viajan a través de cables de fibra óptica que recorren el suelo de los océanos. Un tercio de la producción global de hidrocarburos procede del subsuelo marino. En un futuro próximo, las regiones oceánicas más profundas pueden resultar esenciales para el desarrollo de dispositivos técnicos, dado el creciente interés en la explotación de yacimientos de minerales estratégicos como el níquel, el cobalto o el manganeso.

La importancia del subsuelo marino para el funcionamiento de las sociedades modernas deriva de su percepción política como territorio: el subsuelo marino es una región delimitada por fronteras, cuyos usos económicos, militares e industriales están regulados por legislaciones nacionales e internacionales. Su naturaleza inhabitable y difícil acceso no impiden que sea tan adecuado como la tierra firme para la explotación de recursos, el transporte de datos y energía o el control militar. Pero, a diferencia del territorio emergido, para percibir e interactuar con el subsuelo marino son imprescindibles técnicas que medien entre nosotros y este espacio.

La percepción del subsuelo marino como un territorio surgió tras la Segunda Guerra Mundial, junto al nuevo orden poscolonial y en íntima relación con la búsqueda de nuevas fuentes de recursos naturales. El desarrollo científico y técnico resultó clave para explorar, conocer y controlar este espacio, y también para entenderlo como una nueva porción sumergida del territorio.

Legislación y anticipación

La Segunda Guerra Mundial transformó nuestra relación con los océanos. La necesidad militar de manejar submarinos y controlar el espacio sumergido impulsó el desarrollo de técnicas como el sónar, que permitían percibir el medio marino para operar en él (como ha estudiado el historiador de la Universidad de Sevilla Lino Camprubí). Pero la guerra no solo transformó nuestra capacidad de actuar en la masa de agua. Al terminar la contienda, la creciente demanda global de hidrocarburos incitó a los países occidentales a buscar nuevas regiones donde asegurar sus provisiones de energía. El Gobierno estadounidense de Harry S. Truman fue el primero en concebir el subsuelo marino como una región cercana al continente donde potencialmente podrían extraerse esos hidrocarburos. En septiembre de 1945, el presidente Truman proclamó que los recursos naturales escondidos bajo la plataforma continental estadounidense pertenecían a Estados Unidos, desencadenando una oleada de proclamaciones similares por parte de otras naciones costeras.

La situación no tenía precedentes: dado que el subsuelo marino nunca había sido utilizado para extraer recursos energéticos, no existía una legislación internacional que regulara sus usos o delimitara sus fronteras. La necesidad de establecer tal regulación llevó a las Naciones Unidas a organizar, en 1958, la primera Convención por la Ley del Mar (UNCLOS I, por sus siglas en inglés), que continuaría con la UNCLOS II en 1962 y la UNCLOS III, entre 1973 y 1982. Representantes de todos los países negociaron



MAPA FISIOGRÁFICO del Mediterráneo. Se indican los puntos de perforación de la campaña 13 del Proyecto de Perforación del Fondo Marino, llevada a cabo en 1970. Se obtuvieron las primeras muestras rocosas del subsuelo marino profundo de la cuenca mediterránea, que arrojaron luz a su historia geológica.

BRUCE C. HEEZEN, MARIE THARP Y WILLIAM B. F. RYAN. MAPA COLOREADO POR HEINRICH C. BERANN EN 1967. FUENTE: THE PLIOCENE RECORD IN DEEP-SEA MEDITERRANEAN SEDIMENTS, WILLIAM B. F. RYAN EN *INITIAL REPORTS OF THE DEEP SEA DRILLING PROJECT*, VOL. XIII, 1973.

los usos y establecieron los límites nacionales del territorio sumergido, pero, como ha señalado el historiador Sam Robinson, lo hicieron teniendo en cuenta a los recursos potenciales, los usos anticipados y las futuras capacidades tecnológicas para explotarlo. Muy poco se conocía de esta región, pero los pronósticos auguraban una nueva frontera de riquezas por descubrir y explotar: la plataforma continental podía esconder hasta doscientos mil millones de toneladas cúbicas de hidrocarburos, mientras en las regiones profundas yacían reservas de cobalto y manganeso para cubrir el consumo global de los próximos doscientos mil años.

En las convenciones UNCLOS se preparaba, en definitiva, un futuro orden mundial apoyado firmemente en los recursos del territorio sumergido. Entre las décadas de los sesenta y los ochenta, el subsuelo marino se situó en el centro de ambiciones nacionales e internacionales como un nuevo espacio donde desarrollar actividades industriales, controlar militarmente y establecer relaciones diplomáticas a través de su estudio cooperativo. Ningún caso ilustra mejor esta nueva comprensión de los océanos que el de Francia, cuyas ambiciones económicas se transfirieron explícitamente desde los territorios coloniales al subsuelo marino.

Recursos naturales y expansión

Tras la Segunda Guerra Mundial, Francia había asegurado sus provisiones de hidrocarburos y minerales estratégicos en los territorios coloniales norteafricanos; pero el rápido proceso de independencia de estas regiones hizo temer futuros problemas en el suministro de energía. Tras la independencia de Argelia, en 1962, las petroleras francesas decidieron buscar nuevas regiones donde garantizar sus provisiones, comenzando a concebir el subsuelo marino como un nuevo territorio: una región que, pese a estar sumergida, era tan adecuada para la exploración, «conquista» —en palabras de los propios representantes de las petroleras— y explotación como las regiones norteafricanas habían sido previamente. Francia se expandió entonces bajo los océanos. Impulsó su exploración a través de las mismas estructuras industriales implementadas en Argelia, dirigidas por los mismos representantes (como el Ministro de Carburantes André Giraud) y proyectó ambiciones económicas similares, aspirando a convertir el subsuelo marino en el pilar energético de la nación.

El interés económico por explorar los océanos se convirtió en un catalizador para el desarrollo científico y técnico, alimentado por el imaginario de las innumerables riquezas escondidas en las profundidades. Las compañías petroleras francesas, unidas bajo la dirección del Ministerio de Industria, diseñaron sistemas de geofísica marina que permitían obtener información sobre la composición del subsuelo marino mediante ondas acústicas. Estas técnicas de origen industrial se transfirieron rápidamente a la esfera académica,

incorporándose en buques de exploración oceanográfica. Los resultados eran tan relevantes para desentrañar el origen y las dinámicas del Atlántico Norte y el Mediterráneo como para buscar yacimientos de hidrocarburos y negociar las fronteras marítimas nacionales en las UNCLOS.

Cooperación y conocimiento

Mientras la exploración del territorio nacional sumergido era motivo de grandes esfuerzos económicos y técnicos en Francia, Estados Unidos, Gran Bretaña o Japón, las aguas internacionales se convirtieron en escenarios ideales para entablar o mejorar relaciones diplomáticas a través de la exploración cooperativa del subsuelo. Por un lado, las naciones emergentes y en vías de desarrollo temían que las grandes potencias pudieran apoyarse en sus capacidades técnicas y científicas para imponer su control sobre los océanos —replicando, eventualmente, un orden mundial equivalente al colonial con el océano como tablero de juego—. La exploración cooperativa, donde técnicas costosas y exclusivas se compartían entre naciones con distintas capacidades tecnocientíficas, aliviaba posibles fricciones internacionales.

El Proyecto de Perforación del Fondo Marino (Deep Sea Drilling Project), el primer proyecto de *big science* en geología marina, iniciado en 1968, ilustra bien la conexión entre industria, ciencia y diplomacia. El proyecto se apoyaba en el *Glomar Challenger*, un buque de perforación oceánica diseñado con los últimos avances en técnicas petroleras. Pese a estar dirigido y financiado por instituciones oceanográficas estadounidenses, geólogos de múltiples nacionalidades embarcaban a bordo con el objetivo de obtener muestras rocosas del subsuelo marino profundo (hasta siete mil metros de profundidad, incluidos la masa de agua y el subsuelo).

Los resultados científicos arrojaron luz sobre las dinámicas de la corteza oceánica y fueron clave para contrastar la teoría de la tectónica de placas; a la vez que sirvieron para afianzar las colaboraciones científicas entre países como Japón, Francia o la Unión Soviética. Tal fue el éxito del Proyecto de Perforación del Fondo Marino que proyectos sucesores (como el Programa Internacional de Descubrimiento Oceánico, donde investigadores de varias naciones se unen en torno al uso compartido de exclusivos buques de perforación profunda) han seguido desarrollándose hasta la actualidad.

Imaginarios y territorios

El imaginario del subsuelo marino como una fuente inagotable de recursos fue menguando durante la década de 1980, a la vez que se imponía una visión más realista de su potencial a corto y medio plazo. Las limitaciones técnicas impedían la producción de hidrocarburos más allá de un centenar de metros de profundidad, y los yacimientos minerales profundos no eran ni tan abundantes ni tan económicamente viables como las evaluaciones preliminares aventuraban. Sin embargo, el declive de este imaginario no impidió que el subsuelo marino siguiera explorándose. Hoy en día, las petroleras extraen hidrocarburos a más de mil metros de profundidad; mientras, empresas mineras se preparan a nivel técnico para extraer minerales en regiones profundas (ecológicamente vulnerables). En este sentido, la regulación internacional del territorio sumergido sigue refinándose conforme emergen nuevos usos del subsuelo.

A pesar de la importancia del suelo y el subsuelo marinos en el mundo actual, solemos excluirlo de nuestra comprensión territorial. Muestra de ello es que, en el imaginario colectivo, no poseemos representaciones visuales del suelo oceánico —sí, en cambio, de la superficie de Marte—. No obstante, no debemos olvidarlo, porque es, y será, un espacio clave para entender la evolución de las dinámicas internacionales.

Beatriz Martínez-Rius, doctora en historia de la ciencia por la Universidad de la Sorbona, investiga en la Universidad de Sevilla en el marco del proyecto DEEPMED.



PARA SABER MÁS

Breaking new ground: The origins of scientific ocean drilling. David Van Keuren en *The machine in Neptune's garden: Historical perspectives on technology and the marine environment*, dirigido por Helen Rozwadowski y David van Keuren. Sagamore Beach, 2004.

The underwater network. Nicole Starosielski. Duke University Press, 2015.

Ocean floor grab: International law and the making of an extractive imaginary. Surabhi Ranganathan en *European Journal of International Law*, vol. 30, n.º 2, págs. 573-600, 2019.

Vast expanses: A history of the oceans. Helen Rozwadowski. Reaktion Books, 2019.

Scientific imaginaries and science diplomacy: The case of ocean exploitation. Sam Robinson en *Centaurus*, vol. 63, n.º 1, págs. 150-170, 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Depósitos minerales creados por fuentes termales submarinas. Peter A. Rona en *IyC*, marzo de 1986.

Hielo inflamable. Erwin Suess, Gerhard Bohrmann, Jens Greinert y Erwin Lausch en *IyC*, febrero de 2000.

¿Compensa la minería en aguas profundas? Thomas Peacock y Matthew H. Alford en *IyC*, julio de 2018.

¿A quién pertenece el Ártico? Mark Fischetti en *IyC*, octubre de 2019.

FORO CIENTÍFICO

COMPLETAR LAS LAGUNAS DEL MICROBIOMA HUMANO

Ha llegado el momento de acabar de secuenciar el «segundo genoma» de la humanidad

Ruth Ley

Este 2022 se ha celebrado el décimo aniversario del primer gran estudio de la diversidad microbiana que acoge el cuerpo humano. Fue publicado en *Nature* por el Consorcio del Proyecto del Microbioma Humano (HMP, por sus siglas en inglés), al cual pertenezco.

Hasta entonces, los microbiólogos sabían que el cuerpo alberga una gran masa de microorganismos, una abrumadora amalgama de bacterias que, junto con arqueas, hongos y virus, coloniza la piel, el tubo digestivo desde la boca hasta el intestino y las vías respiratorias, y que en conjunto recibe el nombre de microbioma. Pero hasta 2012 no disponíamos de un inventario de todos estos microorganismos.

En realidad, dicho inventario, con 10 billones de células pertenecientes a miles de especies y que supone 200 gramos del peso de cada persona, sigue incompleto hoy en día. Ha llegado la hora de ampliar ese primer trabajo y poner al día el proyecto con el fin de que represente a la humanidad con toda su complejidad.

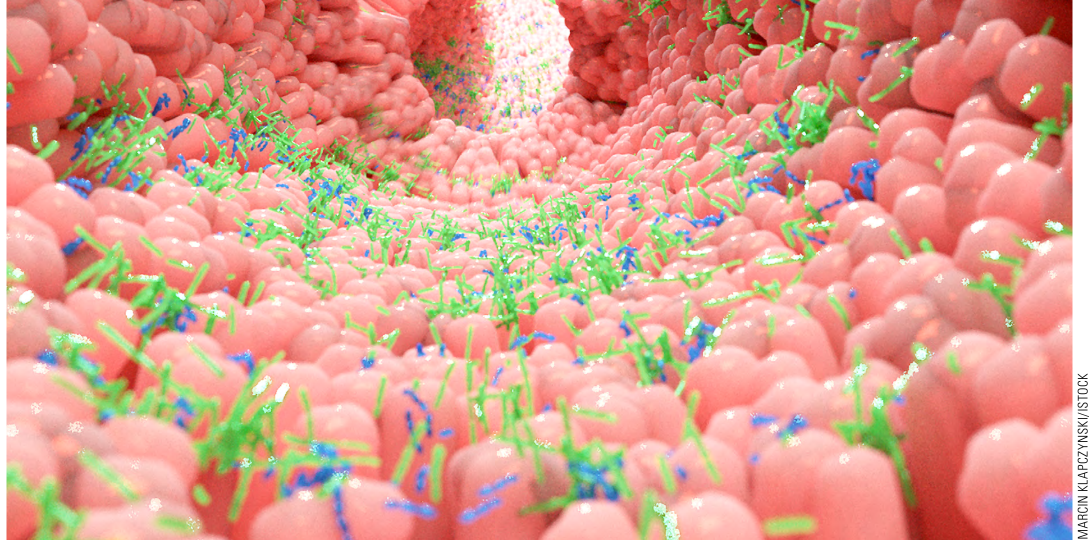
Los preparativos de aquel trabajo pionero llevaron mucho tiempo y durante el decenio transcurrido la velocidad del progreso ha sido vertiginosa. El HMP no pudo arrancar hasta que no se simplificaron y abarataron las técnicas de secuenciación génica de alto rendimiento, diseñadas en su origen para investigar el genoma humano.

Después de su presentación en 2007, el consorcio secuenció el ADN de los microbios hallados en 242 personas naturales de dos ciudades de Estados Unidos, Saint Louis, en Misuri, y Houston, en Texas. Estas personas fueron elegidas por su cercanía a dos de los más prestigiosos centros de secuenciación del momento: el Instituto McDonnell del Genoma de la Facultad de Medicina de la Universidad Washington, en Saint Louis, y la Escuela de Medicina de Baylor, en Houston. Nuestras actividades fueron financiadas por la Fundación Común de la Red de Institutos Nacionales de Salud de EE.UU., y el proyecto prosiguió gracias a los bioinformáticos especializados en el microbioma que trabajaron con los datos que habíamos generado.

El fruto fue el primer catálogo exhaustivo del microbioma del ciudadano estadounidense sano: una lista íntegra de los genes pertenecientes a los microbios que colonizan el intestino. El HMP reveló que los microorganismos unicelulares pertenecen a millares de especies, con una huella genética 150 veces mayor que la del genoma humano. Esa abundancia acabó llevando a los biólogos a ver el microbioma como un «segundo genoma» de origen ambiental oculto en el hospedador humano.

Al cabo de diez años sabemos mucho más. El microbioma es esencial para la salud y el correcto funcionamiento del organismo, es clave para digerir los alimentos y mantener a raya a los patógenos. Los experimentos con ratones han demostrado que su composición influye en el grado de sociabilidad y de ansiedad. Afecciones frecuentes como las enfermedades cardiovasculares y la obesidad están vinculadas a diferencias en el microbioma. Y cada vez está más claro de qué modo adquiere el bebé el suyo y qué factores influyen en su evolución.

(A la vista estos resultados, me resulta sorprendente que deleguemos tantas funciones



Poco se sabe sobre las diferencias del microbioma, como el intestinal, entre los grupos humanos.

en la miríada de microorganismos que desde el preciso instante de nacer tomamos del ambiente.)

De igual forma, tenemos multitud de preguntas sesudas que aguardan una respuesta. ¿En qué momento de la evolución humana se originó el microbioma? ¿En qué se diferencian los microbiomas de la humanidad de aquellos de los demás primates, del resto de los mamíferos o de los otros animales en general? ¿Cómo migra el microbioma de una persona a otra? ¿Y qué repercusión tienen a la larga los hábitos higiénicos y los cambios de la alimentación en la salud del microbioma?

Ese primer análisis de hace diez años, que apenas contó con personas de dos ciudades de Estados Unidos, supone un fracaso estrepitoso en lo que concierne a la captación de la verdadera diversidad del microbioma humano. Ahora sabemos que los habitantes de Europa y de América del Norte no poseen un microbioma tan variado como el de los pobladores de otras regiones menos industrializadas, pero poco se sabe sobre las diferencias entre los grupos humanos.

Menos aún sabemos de las multitudes de microorganismos que habitan en los animales. El microbioma de los animales cautivos difiere del de sus iguales en libertad, de modo muy similar a como los microbiomas de los ciudadanos de los países industrializados difiere del de los no industrializados. La mayoría de nuestros conocimientos acerca de los microbios asociados a los animales procede de estudios con ejemplares criados en cautividad. La pérdida de diversidad zoológica motivada por el cambio climático acelerado supone también una pérdida de diversidad microbiómica.

Averiguar más exigirá un nuevo consorcio que se encargue de obtener muestras de miles de personas y de animales. Los zoólogos de campo y los microbiólogos especialistas en el microbioma tendrán que colaborar codo con codo, con equipos repartidos por todo el globo. Hace una década, el análisis fue tan novedoso y difícil que no se prestó gran atención a la toma de las muestras; ahora la prioridad debe ser su obtención de fuentes a escala mundial.

Alguien podría preguntar por qué necesitamos un nuevo consorcio, multitudinario y caro cuando ya estamos recibiendo datos, aunque sea con cuentagotas, de estudio en estudio, de la mano de laboratorios que trabajan por separado. La respuesta es que la industrialización avanza con suma rapidez y que las fuerzas económicas actuales tienen el poder de aniquilar la diversidad microbiana más rápido de lo que podemos observarla.

Un nuevo consorcio permitiría llenar por fin los espacios en blanco del mapa del microbioma. Es como un censo humano: no se espera a que cada localidad comunique la cantidad de habitantes, sino que se organiza un sistema que sea capaz de hacerlo de forma sistemática y en breve tiempo, antes de que cambie.

Un nuevo y vasto análisis de la diversidad del microbioma de la humanidad, así como del microbioma todavía más amplio de los vertebrados, situará por fin los datos de nuestra especie en el contexto del árbol de la vida. Solo entonces podremos aplicar realmente la etiqueta de «humano» al microbioma.

Ruth Ley es la directora del Departamento de Ciencias del Microbioma, en el Instituto Max Planck de Biología de Tubinga.



CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

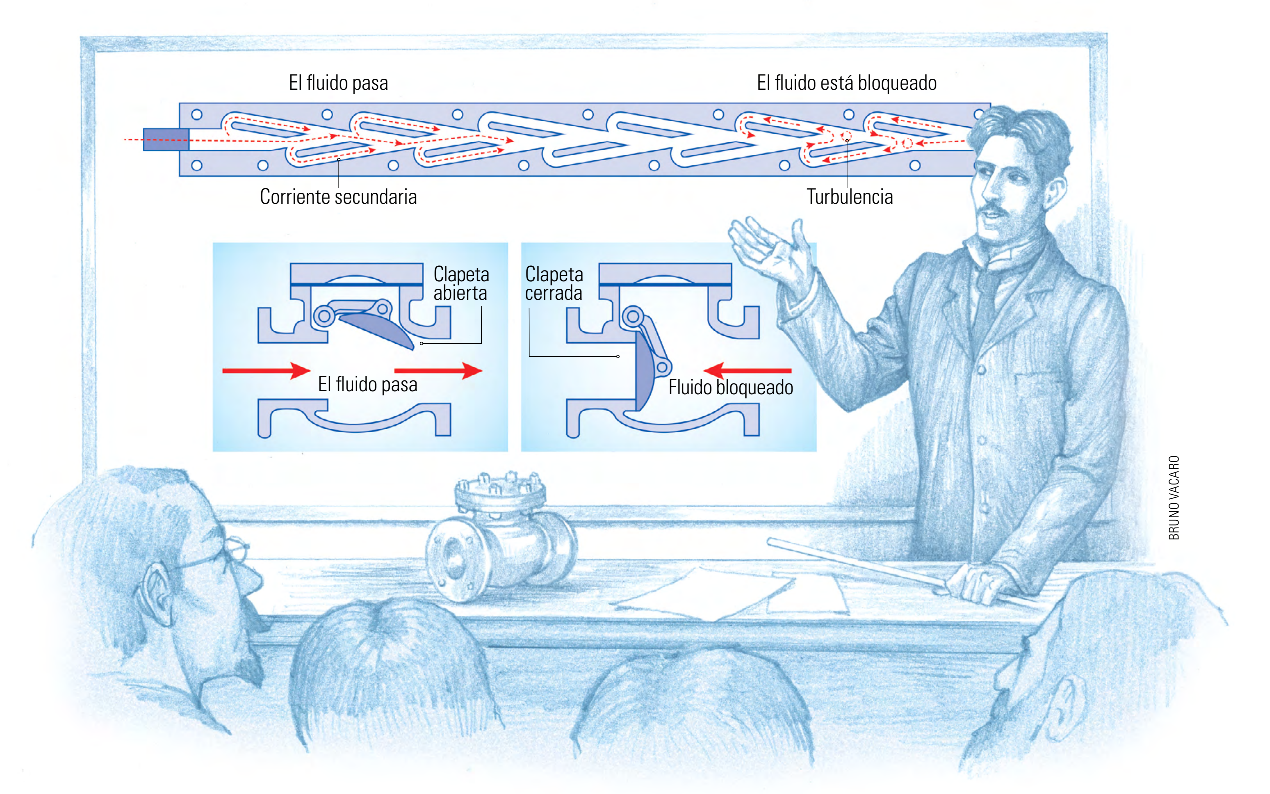
UN CANAL DE SENTIDO ÚNICO

El inventor Nikola Tesla patentó un sistema de válvulas que solo permite la circulación de fluidos en un solo sentido y ello sin piezas móviles. Su eficiencia todavía se discute

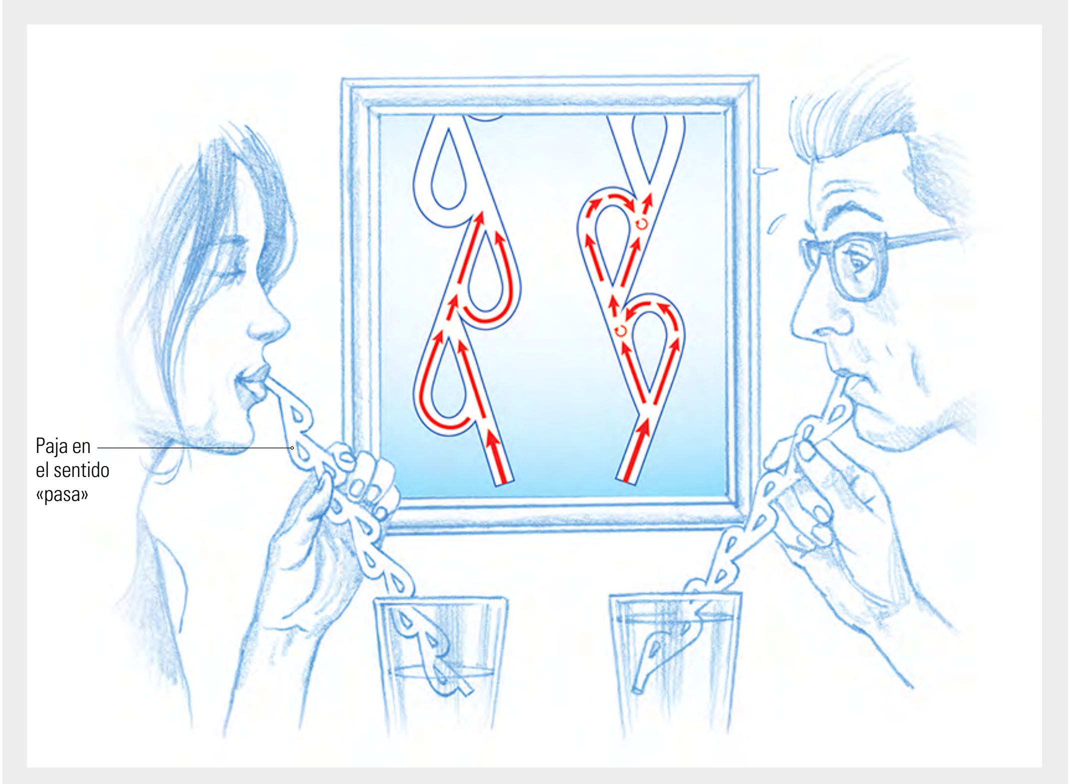
Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Generador de alta frecuencia, transporte de energía eléctrica en forma de corriente alterna, comunicaciones y transmisión de energía inalámbricas... la lista de los inventos de Nikola Tesla es larga. De ellos, uno ha estado olvidado mucho tiempo. Se trata de un dispositivo carente de piezas móviles que, como un diodo con la electricidad, deja circular un fluido en un solo sentido. La idea fue patentada en 1920 sin haber sido prototipada, poco antes de la quiebra de la empresa del genial inventor americano de origen serbio.

El procedimiento ha suscitado un reciente interés por parte de aficionados que se divierten construyendo prototipos y jugando con ellos, y de científicos e ingenieros deseosos de comprender



Nikola Tesla presenta ante una audiencia de expertos un dispositivo que no deja pasar los fluidos más que en un sentido (*arriba*). Ventaja: carece de piezas móviles, a diferencia de las válvulas de clapeta (*abajo*), que carecen de desgaste.



La paja en el vaso ajeno

El sistema de Tesla, aquí trasladado a pajitas, se basa en la orientación relativa de las distintas corrientes del líquido. En un sentido, las corrientes secundarias son débiles, limitadas y orientadas como la principal (*izquierda*): el líquido fluye del vaso a la boca. En el otro sentido, las corrientes laterales se oponen a la principal y crean turbulencias (*derecha*): ¡un refresco que se resiste!

BRUNO VACARO

su funcionamiento y de considerar la posibilidad de desviarlo de su uso inicial en compresores y turbinas. El fin esencial de estos trabajos: confirmar o desmentir la predicción de Tesla del valor de 200 para el cociente entre el caudal en el sentido favorable de circulación y el caudal en el sentido desfavorable. Sorpresa: la cuestión no está resuelta del todo.

Obstáculos y trampas

Más allá de la curiosidad sobre el invento de un personaje extravagante, controlar el sentido de un fluido en las canalizaciones es un requisito en un número increíble de aplicaciones, no solo en diversos dispositivos industriales, sino también en los sistemas de perfusión médica o en los circuitos microfluídicos. Una bomba, por ejemplo, no debe expulsar lo que acaba de aspirar. Para evitar los reflujos, los ingenieros usan válvulas o clapetas, cierres antirretorno (*véase la primera ilustración*). De estos dispositivos existen múltiples formas, pero su principio de funcionamiento es siempre el mismo: la apertura y el cierre de una válvula de asiento, o sea, de un obturador móvil que normalmente se mantiene cerrado y que permite el paso de un fluido bajo el efecto de la presión.

Cuando la presión del fluido se ejerce por un lado, la válvula se comprime contra un tope y bloquea la corriente. Al revés, cuando la presión se ejerce sobre el otro lado, la válvula se abre y deja pasar el fluido. Cuando cesa la circulación, un mecanismo de retención, un resorte por ejemplo, cierra la válvula.

El mecanismo es simple y robusto, pero tiene un talón de Aquiles: el desgaste de sus piezas móviles, sobre todo en situaciones en las que el fluido es pulsátil y su circulación cambia con frecuencia de sentido. Su rotura daña a toda una máquina. Este es uno de los motivos que esgrimió Tesla para proponer su «conducto valvular», que contiene, recuperando sus propias palabras, «ensanchamientos, refuerzos, obstáculos, trampas y pliegues» que casi no ofrecen resistencia al

paso de un fluido en un sentido (sin contar los rozamientos en las paredes) y que constituyen una barrera casi infranqueable en el otro sentido.

El inventor desarrolla una argumentación que parece un modelo de sensatez y sobre la cual se ha vuelto repetidamente desde entonces. Cuando se inyecta fluido por un extremo (*arriba en la primera ilustración*), la corriente principal se mueve por el conducto central; existen desde luego corrientes secundarias por los laterales, pero son muy débiles, pues el fluido debe retroceder para entrar en ellos. Además, retornan a la corriente principal perturbándola poco, ya que todas se mueven en la misma dirección.

Por el contrario, por el otro extremo, el fluido se escinde más fácilmente en dos en cada intersección, como por efecto de una cuña. Justo después, la corriente central desemboca en una zona que se ensancha, lo cual la lentifica, mientras que la corriente de su lateral se ve forzada a dar casi media vuelta en la zona en forma de pliegue y a retornar contracorriente a la corriente principal. Ello favorece la aparición de turbulencias y la disipación de energía, y provoca una gran lentificación del flujo. Y estas perturbaciones se reproducen cada vez que a lo largo de la válvula se repite (11 veces en la patente original) el segmento básico que la caracteriza. Algo para no dudar mucho del valor de 200 que Nikola Tesla predice para el cociente entre los caudales. Máxime considerando que un trabajo basado en una simulación numérica de mecánica de fluidos realizada en 2013 por un estudiante de máster pareció corroborarlo: halló un factor de reducción del caudal que llegaba a 40 para una válvula de 4 segmentos.

El físico Leif Ristroph y sus colaboradores de la Universidad de Nueva York se propusieron zanjar la cuestión. Construyeron una válvula de Tesla y realizaron medidas cuantitativas de caudales de agua o de una mezcla de agua y glicerol haciendo variar la diferencia de presión entre los extremos de la válvula. Primera conclusión: cuando, en el fluido, las fuerzas de inercia son mucho menores que la de viscosidad (su relación, un número adimensional llamado número de Reynolds, *Re*, es entonces menor que 1), la corriente del fluido es laminar, y las ecuaciones de la mecánica de fluidos se tornan lineales y reversibles. Por tanto, no deben existir entonces diferencias entre los caudales en uno y otro sentido.

El arte de mezclar bien

Las turbulencias aparecen, pues, para *Re* mayor que 1, que es el caso de las corrientes fluidas habituales. Experimentalmente, hasta *Re* = 100 no

Corrientes y colorantes

El físico Leif Reistroph y sus colegas de la Universidad de Nueva York han estudiado con detalle el dispositivo de Tesla valiéndose de colorantes. En el sentido favorable (*arriba*) dos hilos de colorante (*verde y azul*) se mantienen inalterados: la corriente no está perturbada. En el otro sentido, en cuanto el número de Reynolds (*Re*) llega a 100, aparecen las turbulencias, y los colorantes se mezclan: la corriente queda aprisionada.

Controlar el sentido de un fluido en las canalizaciones es un requisito en un número increíble de aplicaciones, no solo en diversos dispositivos industriales

pasa nada: la relación de caudales se mantiene siempre en torno a... ¡1! Pasado ese umbral de 100 se comprueba un aumento súbito de la relación entre caudales: llega a 2 para *Re* en torno a 1000 y sigue creciendo después. En todo caso, ¡se halla lejos de una relación de 200!

Gracias a los colorantes, los investigadores pudieron visualizar con mayor precisión el movimiento del fluido por el interior de la válvula. En el sentido favorable, y hasta al menos un *Re* de 200, dos hilos de colorante inyectados uno junto a otro en la corriente central conservan su integridad a lo largo de toda la travesía por la válvula (*véase la ilustración de la página anterior*). En el caso desfavorable, se comprueba que la corriente se torna turbulenta para *Re* de 50 a 200, mucho antes que en un tubo estándar, por ejemplo, donde ello ocurre en torno a 2000. Para un valor de 50, los hilos de colorante se separan bastante rápido y vuelven a encontrarse en las corrientes laterales, donde se dispersan para rodear los «islotes» de la válvula. Para 200, por contra, se mezclan rápidamente con el resto del fluido en las zonas de retorno de las corrientes secundarias hacia la corriente central, zonas que son manifiestamente asiento de fuertes turbulencias. En seguida, el fluido se homogeneiza. Así, la válvula sería útil para mezclar fluidos en un régimen de corriente inhabitual (con unos *Re* bajos). Todo ello resulta al final bastante acorde con los mecanismos cualitativos presentados por Tesla, es solo que las prestaciones cuantitativas no alcanzan el nivel esperado.

¿Debemos, pues, perder toda esperanza en un dispositivo antirretorno sin piezas móviles? ¡No! Por una parte, podemos intentar retocar el diseño de la válvula para mejorarla. Ristroph ha estudiado un modelo en que tabiques en ángulo cierran contra el costado la circulación del fluido en un sentido: se consiguen relaciones de caudal del orden de 4. Un avance.

Además, él mismo se interesa por el régimen pulsátil: en vez de constante, la diferencia de presión entre los extremos de la válvula varía de forma periódica. Su equipo ha construido el equivalente a un puente de diodos en electricidad, que permite redirigir una corriente alterna tras los pasos de Tesla. Contrariamente a un diodo ideal, en nuestra válvula la fuga es elevada en el sentido «no pasa»: no se activa salvo si la amplitud y la frecuencia de la variación de presión son elevadas, y nuestro «puente» deja pasar un caudal levemente modulado en un solo sentido. Cuantitativamente, parece que el régimen pulsátil aumenta de forma muy notable las prestaciones de la válvula, ¡como, por cierto, había predicho Tesla!

Más aún, una aplicación posible para estas válvulas sería emplearlas para aprovechar las inevitables vibraciones presentes en los motores para hacer circular fluidos como el carburante, los lubricantes... en un solo sentido, es decir, como si fueran bombas sin piezas móviles, accionadas por una energía que, de otro modo, se perdería.

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad de la Sorbona, en París.



PARA SABER MÁS

Valvular conduit. Patente US-1329559. Nicola Tesla. *Oficina de Patentes y Marcas de Estados Unidos*, 1920.

Tesla's fluidic diode and the electronic-hydraulic analogy. Quyn M. Nguyen et al. en *American Journal of Physics*, vol. 89, n.º 3, pág. 393, 2020.

Early turbulence and pulsatile flows enhance diodicity of Tesla's macrofluidic valve. Quyn M. Nguyen, Joanna Abouezzi y Leif Ristroph en *Nature Communications*, n.º 12, 2021.

ENTREVISTA

«EL MAYOR RETO PARA LA QUÍMICA ES DESACOPLAR EL DESARROLLO ECONÓMICO DEL IMPACTO AMBIENTAL»

Javier García Martínez, presidente de la IUPAC, explica cómo ha evolucionado esta institución centenaria y los principales retos que afronta en la actualidad

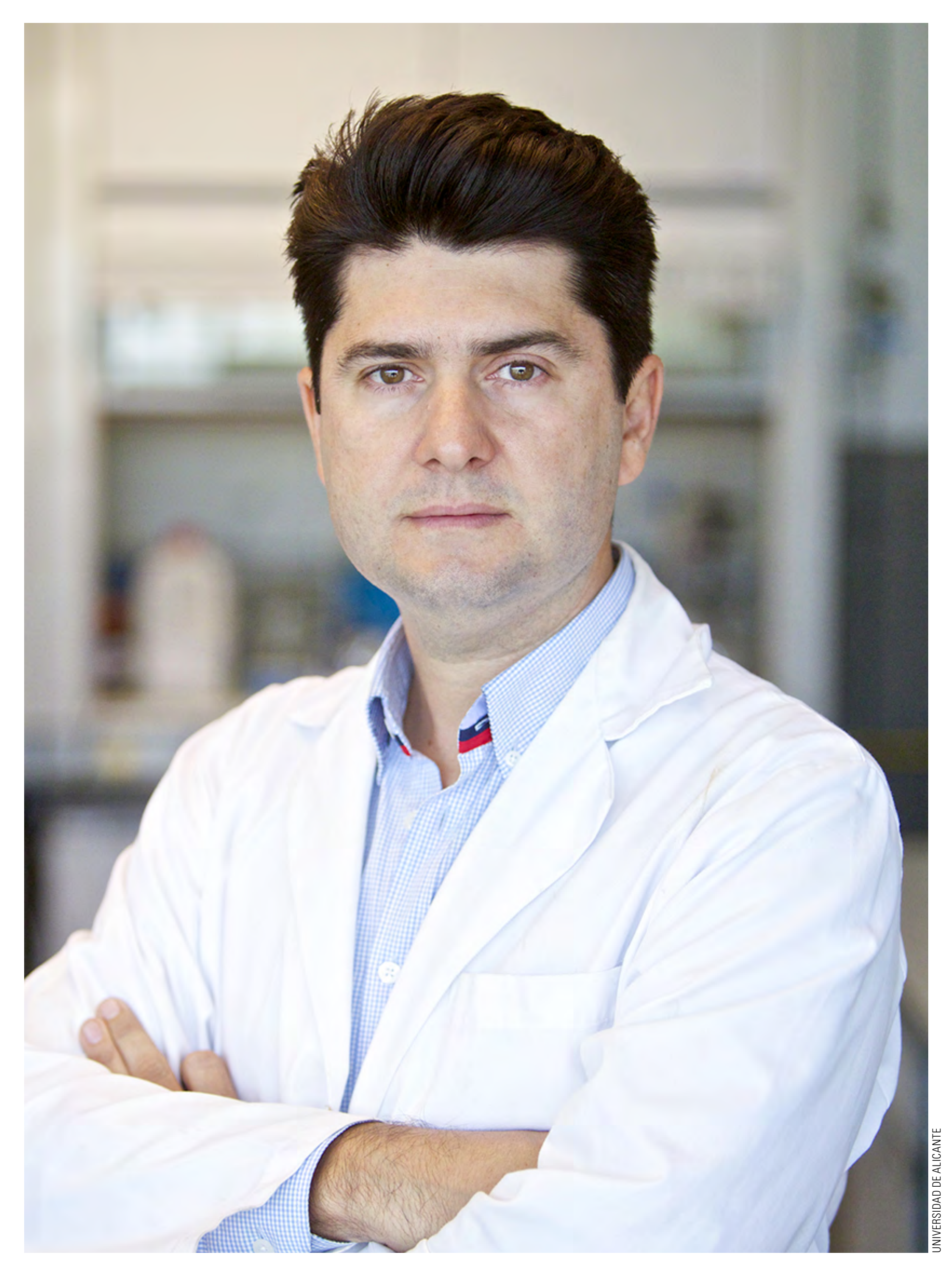
Bernardo Herradón

Ante la necesidad de disponer de un sistema estandarizado de pesos, medidas, nombres y símbolos, en 1919 la comunidad internacional de químicos, procedentes tanto del mundo académico como de la industria, creó la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC, por sus siglas en inglés). Poco más de un siglo después, esta institución normalizadora está presidida por Javier García Martínez, catedrático de química inorgánica de la Universidad de Alicante y el primer español en ocupar este cargo. El inicio de su mandato (enero de 2022) coincidió con una situación de crisis global. En ese momento estábamos saliendo de la etapa más cruenta de la pandemia de COVID-19 y, poco después, comenzó la invasión rusa de Ucrania. Aprovechamos la ocasión para hablar con él y hacer balance de este primer año en la presidencia de la IUPAC.

¿Cómo han evolucionado los objetivos y la misión de la institución?

La IUPAC se creó hace poco más de cien años, en julio de 1919, en París, para consensuar las normas que hacen posible el desarrollo de la ciencia y la industria químicas. Durante mucho tiempo, los químicos habían intentado sin éxito ponerse de acuerdo a la hora de nombrar las sustancias. La ausencia de reglas claras y universalmente aceptadas se hizo insostenible a principios del siglo XX, en pleno desarrollo de la industria química. Parece increíble, pero durante la mayor parte de la historia de nuestra ciencia, es decir, desde finales del siglo XVIII hasta bien entrado el XX, los químicos no hablaban el mismo idioma. Imaginemos qué hubiera sido de las matemáticas si no nos hubiéramos puesto de acuerdo en cómo representar una división, una fracción o una derivada. Sin una lengua común, la ciencia es como una orquesta que toca sin partitura.

Más de cien años después, la IUPAC es una organización clave para el desarrollo de la química. Por un lado, ha creado una lengua para esta disciplina, mediante un vocabulario (terminología) y una sintaxis (nomenclatura). Por otro, financia decenas de proyectos de investigación y organiza congresos y cursos. Nuestra misión es que la química contribuya a mejorar la calidad de vida de las personas y la sostenibilidad del planeta. Para eso hacemos muchas más cosas que poner nombre a las sustancias. Por ejemplo, la IUPAC proporciona datos verificados que son fundamentales para el desarrollo de la ciencia y


UNIVERSIDAD DE ALICANTE

JAVIER GARCÍA MARTÍNEZ nació en Logroño. Es catedrático de química inorgánica y director del Laboratorio de Nanotecnología Molecular de la Universidad de Alicante, donde ha centrado su labor en los nanomateriales y su aplicación en el sector energético. En 2005 fundó Rive Technology, empresa que comercializa la tecnología sobre catalizadores que desarrolló durante su estancia posdoctoral en el Instituto Tecnológico de Massachusetts. En 2007 entró en la IUPAC como miembro de la División de Química Inorgánica. Después se integró en el comité de dirección y desde 2022 ocupa la presidencia. Es catedrático de la Fundación Rafael del Pino, en la que dirige el informe *Diez tecnologías para impulsar España*. En 2011 fue vicepresidente del Consejo de Tecnologías Emergentes del Foro Económico Mundial. Ha recibido varios premios relacionados con el liderazgo científico y empresarial.

la industria: me refiero a los pesos atómicos, la abundancia isotópica, los datos espectroscópicos y las constantes termodinámicas y cinéticas. Asimismo, desarrollamos métodos de medida que permiten determinar, por ejemplo, el peso atómico de un elemento químico, la superficie específica de un sólido o la solubilidad de una sustancia en agua.

¿Está la IUPAC implicada en tareas educativas y en la difusión social de la ciencia?

Desde hace años, esta es una de nuestras prioridades. Actualmente, llevamos a cabo un buen número de actividades divulgativas y de fomento de las vocaciones científicas. El concurso Periodic Table Challenge propone cientos de preguntas sobre los elementos químicos en un formato en línea (disponible también en español), en el que han participado más de un millón de jóvenes de 150 países. En el proyecto sobre las 10 Técnicas emergentes en química, cada año nuestros expertos seleccionan y explican las técnicas que están contribuyendo a crear un futuro más sostenible, mejorar nuestra salud y sustituir las fuentes de energía fósiles por otras renovables. En la Conversación Global sobre Sostenibilidad, cada 25 de septiembre organizamos actividades, seminarios, debates y talleres para tratar y concretar acciones que nos ayuden a desarrollar una química más respetuosa con el ambiente. Queremos cambiar la forma en la que nos relacionamos con los ciudadanos. En vez de darles conferencias, queremos escucharlos. Conversar e imaginar juntos acciones que nos ayuden a construir un futuro mejor para todos.

En cuanto a la labor educativa, es evidente que la brecha entre la química que es posible, es decir, aquella que se utiliza en los laboratorios y en la industria, y la que se enseña en las aulas no deja de crecer. Por eso, en la IUPAC trabajamos para adecuar los programas educativos a las necesidades laborales del futuro químico.

Además, estamos trabajando para conectar mejor la comprensión de la realidad molecular (reacciones, enlace y estructura) con su impacto en la industria, el planeta y nuestra salud. Por ejemplo, cuando explicamos el CO_2, normalmente decimos que se trata de una molécula lineal, que en su estructura hay dos dobles enlaces y que reacciona con muchos óxidos metálicos para dar carbonatos. Pero en demasiadas ocasiones no hablamos del papel que las personas tenemos en su acumulación en la atmósfera, su efecto sobre el clima y, sobre todo, qué soluciones ofrece la ciencia para reducir sus emisiones como, por ejemplo, las nuevas células solares basadas en perovskitas o el hidrógeno proveniente de las energías renovables.

Hemos creado una página web con recursos para aprender química en contexto, que relaciona los temas con las preocupaciones e intereses de los jóvenes. Allí pueden encontrar muchísimo contenido sobre nuevos materiales y el modo en que estos nos pueden ayudar en cuestiones relacionadas con la energía, el medioambiente o la salud. También publicamos *Chemistry Teacher International*, una revista gratuita para profesores de química en la que se comparten recursos, información, artículos de investigación y experimentos para el aula. Asimismo, quiero mencionar el programa de Jóvenes Embajadores de la Química, que llevamos organizando desde hace casi veinte años y que consiste en talleres formativos para profesores de química y actividades de divulgación científica para jóvenes.

Como ves, no paramos. De hecho, nuestro comité de educación es uno de los más activos. Además, hacemos un esfuerzo muy especial para mejorar la enseñanza de la química en países en vías de desarrollo. Por citar solo un par de ejemplos, me gustaría destacar los proyectos «Mejora de la educación de la química en colegios e institutos de Etiopía» y «Educación en sostenibilidad en Latinoamérica».

A menudo la química se asocia a «lo artificial», y ello, a su vez, se interpreta como sinónimo de «perjudicial». ¿Desde la IUPAC se está intentando cambiar esta percepción negativa de la química?

La dicotomía natural-sano, artificial-perjudicial no solo es falsa, sino peligrosa. De hecho, ha contribuido a las campañas negacionistas que tanto daño han hecho durante la pandemia. Las vacunas nos ayudan a salvar vidas, los antibióticos a combatir bacterias muy peligrosas y los desinfectantes son una excelente protección contra muchas enfermedades. Por otro lado, productos tan naturales como ciertas plantas o la piel de varios animales pueden contener sustancias peligrosísimas.

Para acabar con esta percepción negativa —que, en muchos casos, manifiesta un profundo desconocimiento—, hace muchos años que organizamos actividades de divulgación, cursos y campañas informativas sobre los beneficios de

la química (pensemos, por ejemplo, en la potabilización del agua, que tantas vidas ha salvado).

¿Cómo está organizada la IUPAC y quiénes son miembros?
El máximo órgano de gobierno de la IUPAC es la Asamblea General. De ella forman parte los países que, como ocurre en las Naciones Unidas, debaten, acuerdan y toman decisiones. De hecho, la IUPAC es algo así como las Naciones Unidas de la química.

El trabajo lo realizamos voluntarios que hemos sido elegidos en función de nuestros conocimientos y experiencia. Estamos organizados en divisiones y comisiones, y desarrollamos iniciativas científicas, educativas y de colaboración con la industria. Además, cualquier científico puede solicitar a la IUPAC financiación para un proyecto, cuyos resultados estarán disponibles para todos.

En el proceso de elección de los miembros, ¿se fomenta la diversidad de género y cultural?
Sí. Además del mérito y la excelencia académica, se tiene en cuenta la diversidad. Solo puede haber un miembro titular por país y seleccionamos expertos con conocimientos lo más complementarios posibles. Tenemos un comité de ética, diversidad, equidad e inclusión cuya misión es asegurar precisamente que la diversidad sea no solo un valor, sino también una realidad.

¿Están el idioma español y la comunidad hispana representados?
En nuestra Asamblea General están representados los países hispanohablantes y muchos de sus científicos trabajan en nuestros comités más importantes. Sin embargo, hasta ahora no habíamos tenido ningún presidente de habla hispana. Esto era, sin duda, una anomalía, ya que España ocupa un lugar destacado en el desarrollo de la química. Según un estudio publicado en *Nature*, somos la décima potencia mundial en publicaciones científicas en el área de química. Además, nuestra industria da empleo de forma directa e indirecta a más de 700.000 personas.

Una de mis prioridades es el fomento del español en la ciencia. En este sentido, quiero destacar la publicación del primer libro en español que reúne los principales textos de la IUPAC (nomenclatura, terminología, unidades y tabla periódica). Un proyecto que ha sido posible gracias a Pascual Román Polo y Efraím Reyes, ambos de la Universidad del País Vasco, y a la Universidad de La Rioja. Esta iniciativa es muy importante, porque gracias a ella todos los estudiantes de habla hispana dispondrán en un solo texto de todas las normas de la IUPAC en su propia lengua.

Lleva quince años trabajando, de manera altruista, en diferentes comités de la IUPAC, y en 2019 fue elegido presidente. ¿Qué cambios se han producido en estos años?
En 2007 entré en la División de Química Inorgánica. Cinco años más tarde, fui elegido miembro del comité de dirección (*bureau*), y desde 2017 pertenezco al comité ejecutivo. Como bien dice, han sido muchos años de servicio, pero también de aprendizaje y una experiencia increíble que me ha permitido trabajar con algunos de los mejores científicos del mundo.

La IUPAC es, a día de hoy, una organización más cercana, más global y más diversa que cuando entré en 2007. Sin duda, los Años Internacionales de la Química (2011) y de la Tabla Periódica (2019) han contribuido a este cambio y han fortalecido nuestra relación con la UNESCO y otras Uniones Científicas Internacionales.

En los últimos años hemos realizado un gran esfuerzo por apoyar y dar oportunidades a jóvenes científicos brillantes. En 2017 creamos la Red Global de Jóvenes Químicos, una organización internacional asociada a la IUPAC que reúne a jóvenes de más de setenta países. Su propósito es fomentar la investigación de excelencia y el emprendimiento científico.

En 2019 la IUPAC organizó el Año Internacional de la Tabla Periódica. ¿Qué destacaría?
Fue un año muy especial, que coincidió con nuestro centenario. Se organizaron miles de actividades en todo el mundo, también en nuestro país. En Murcia se construyó la tabla periódica monumental y numerosas universidades e institutos de España llevaron a cabo actividades que conectaron la química con distintos aspectos de nuestra vida, el medioambiente y la industria. Entre otros muchos actos, organizamos el ya mencionado concurso global sobre la tabla periódica, en el que han participado millones de jóvenes. El éxito de esta y otras iniciativas similares fue tan grande que decidimos continuarlas y, a día de hoy, siguen creciendo, contribuyendo a dar visibilidad a la IUPAC y a mejorar la per-



JAVIER GARCÍA MARTÍNEZ

EN LA IUPAC ESTÁN REPRESENTADOS un gran número de países y culturas. Esta imagen, tomada en el acto del centenario celebrado en París, en julio de 2019, durante el Congreso Mundial de Química, reúne a miembros del Comité Ejecutivo y de la Red Internacional de Jóvenes Químicos (*de izquierda a derecha*): Juris Meija (Consejo Nacional de Investigación, Canadá), Christine Dunne (Universidad Estatal de Colorado, EE.UU.), Nnanake-Abasi Offiong (Universidad de Uyo, Nigeria), Javier García Martínez (Universidad de Alicante), Supawan Tantayanon (Universidad Chulalongkor, Tailandia), Hooi Ling Lee (Universidad de Ciencias de Malasia), Mary Garson (Universidad de Queensland, Australia) y Laura McConnell (Bayer, EE.UU.).

cepción social y la comprensión de la química en todo el mundo.

Desde el pasado mes de junio estamos celebrando el Año Internacional de las Ciencias Básicas para el Desarrollo Sostenible. Como presidente de la IUPAC, está muy involucrado en ello, ¿no es así?
Efectivamente. Después de muchos años en los que los científicos celebrábamos Años Internacionales dedicados a nuestra propia disciplina (química, matemáticas, física...), finalmente nos hemos puesto de acuerdo para celebrar la ciencia sin apellidos y destacar su papel fundamental en la construcción de un futuro más sostenible. Además, hemos querido poner el acento en la ciencia básica o, mejor dicho, basal, es decir, la que está en la base de todo lo que hacemos.

El 8 de julio tuve el privilegio de asistir, con otros presidentes de uniones científicas internacionales, a la presentación del Año Internacional de las Ciencias Básicas para el Desarrollo Sostenible en la sede de la UNESCO en París. Allí transmitimos con claridad y una sola voz el mensaje central de este Año Internacional, esto es, que para resolver los grandes problemas que nos afectan a todos, no sobra nadie, y que solo con inteligencia y colaboración podremos hacer frente a las amenazas que nos ponen en peligro a todos.

A veces asociamos la IUPAC únicamente con la nomenclatura química y con la tabla periódica. ¿Qué criterios hay para denominar a los nuevos elementos químicos?
Las personas que hacen un descubrimiento, bien sea un elemento químico, un nuevo insecto o una nueva planta, tienen el privilegio de ponerles nombre. La IUPAC es la organización que fija y vela por el cumplimiento de los criterios para nombrar nuevos elementos químicos. En algunos casos, los descubridores han tenido que modificar

su propuesta inicial porque no cumplían alguna de las normas. Por ejemplo, recuerdo que en el caso del elemento 112, los descubridores tuvieron que cambiar su propuesta de símbolo para el copernicio (Cp) porque había sido utilizado anteriormente para el casiopio, hoy lutecio.

En cuanto a los criterios que hay que seguir para nombrar un nuevo elemento químico, este debe estar relacionado con un tema mitológico o astronómico, un mineral, un lugar o región, las propiedades del elemento o un científico.

Hace pocos años participé en la creación de las normas que deben seguirse a la hora de nombrar nuevos elementos químicos. Por eso, cada vez que veo una tabla periódica y leo el nombre de teneso u oganesón, recuerdo cuando propuse que se nombraran de esa manera y no tenesio y oganesio, como dictaba la norma anterior. Puede parecer un cambio menor o caprichoso, pero es importante porque al mantener la terminación propia del grupo se refuerza la idea de que los elementos del mismo grupo tienen propiedades similares.

¿Cuál es su opinión sobre los nombres que se han dado a los últimos elementos?

Personalmente, y como ya he dicho públicamente, me apena que los nombres de los últimos elementos tengan un tinte nacionalista o personalista [«teneso» responde a Tennessee, sede del Laboratorio Nacional Oak Ridge; «oganesón» es en honor al físico nuclear Yuri Oganessian], y considero que esto es un signo de los tiempos. Me encantaría que los descubridores propusieran nombres más inspiradores, por ejemplo, el de alguna gran científica. De esta forma contribuirían a fomentar las vocaciones entre las mujeres; pero eso depende de ellos. Por eso, invito a las personas a que descubran nuevos elementos, a que piensen con altura de miras y aprovechen la oportunidad que tienen de nombrar un elemento químico para celebrar lo que nos une en vez de reivindicar lo que nos distingue.

Se está trabajando en la síntesis de los elementos 119 y 120, y luego vendrán el 121 y el 122, con lo que empezaremos el bloque g. Habrá que utilizar un nuevo formato de tabla periódica. ¿Cómo será?

Efectivamente, pronto tendremos los elementos 119 y 120 en los que están trabajando varios equipos internacionales. Así que estamos a las puertas del bloque g y, por tanto, tendremos que reimaginar la tabla periódica. Esto no hace sino recordarnos la dificultad de simplificar en una mera tabla la riqueza y la complejidad de la ley periódica. Cada par de semanas recibo un correo electrónico de alguna persona que me invita a considerar una nueva tabla periódica, indicándome que la actual es insuficiente o incompleta. Creo que vamos a necesitar toda esa creatividad para poder incluir un nuevo bloque para los elementos g.

La brecha entre la química que es posible, aquella que se utiliza en los laboratorios y en la industria, y la que se enseña en las aulas no deja de crecer

¿Qué iniciativa de la IUPAC destacaría por su importancia para el desarrollo de la química?

Uno de nuestros proyectos más importantes es la creación de una nueva nomenclatura química para las máquinas. Gracias a ella vamos a acelerar el desarrollo y la aplicación de la inteligencia artificial en la química. Este trabajo es fundamental porque la manera en la que nombramos las sustancias hoy en día está pensada para las personas, pero no para las máquinas. Por eso hemos creado el Identificador Químico Internacional (InChI, por sus siglas en inglés). Se trata de un sistema que permite nombrar cualquier sustancia, diseñado específicamente para que los ordenadores puedan leer, interpretar e intercambiar información química de forma rápida, inequívoca y normalizada. El proyecto forma parte de una gran estrategia más amplia que estamos llevando a cabo para definir los estándares digitales que permitan que tanto los ordenadores como los robots puedan entender, compartir y ejecutar información química.

Ahora, un tema delicado. El comienzo de su mandato coincidió con la invasión rusa de Ucrania. ¿Cuál ha sido la actitud de la IUPAC en relación con el conflicto?
La IUPAC ha condenado de forma pública y enérgica la invasión de Ucrania desde el mismo día que Rusia comenzó la invasión. Desde ese momento estamos trabajando con otros organismos internacionales, especialmente con el Consejo Internacional de Ciencia, para dar a los refugiados ucranianos las oportunidades y ayudas que necesitan. Como presidente, mi obligación es mantener la organización unida y asegurar que nuestros científicos puedan llevar a cabo su trabajo con el mayor rigor y en las condiciones de seguridad necesarias.

¿Qué aspectos de la IUPAC cree que necesitan mejorar? ¿Cuáles son los principales retos internos de la institución?
Fui elegido para presidir la IUPAC el mismo año en el que celebrábamos nuestro centenario. Una de mis prioridades ha sido, precisamente, modernizar la estructura interna de la organización para hacerla más ágil y adaptada a una realidad que ha cambiado mucho. Después de un proceso de análisis y revisión que duró tres años, en junio de 2022 los países que forman parte de la IUPAC aprobaron con más del 90 por ciento de los votos el cambio que les propuse y que es el más importante en la estructura interna de la IUPAC de su historia: el comité directivo (*bureau*), que estaba formado por más de 25 personas, ha sido sustituido por un comité ejecutivo, de solo 10 miembros, que se encarga del gobierno y la administración de la IUPAC. Además, hemos creado un comité científico que nos ayuda a definir nuestra estrategia y a identificar las áreas prioritarias de trabajo. Asimismo, conseguí que se creara el comité de ética, diversidad, equidad e inclusión, que va a tener un papel muy importante en el diseño del reglamento interno, de las políticas de diversidad y de las guías éticas de la institución. Son cambios muy profundos en una organización muy grande y centenaria, pero necesarios para que podamos seguir sirviendo a la comunidad científica en un tiempo muy distinto al de la Europa que quedó tras la Primera Guerra Mundial.

Finalmente, ¿cuál es el mayor reto para la química?
Creo que el mayor reto en las próximas décadas es desacoplar el desarrollo económico del impacto ambiental. Se trata de un reto monumental que requiere una nueva química. Los pequeños cambios o mejoras parciales que estamos desarrollando actualmente son insuficientes. La reinvención de la química de la que estoy hablando es un cambio completo de paradigma. Consiste en el paso de una ciencia y una industria de la transformación, es decir lineales, a una nueva ciencia e industria basadas en la reutilización, es decir, circulares. Para que ello sea posible, debemos diseñar las moléculas y los procesos de forma que sea más fácil recuperar y transformar los productos, tras su uso, en materia prima. En este sentido, creo que el aprendizaje automatizado y la inteligencia artificial van a desempeñar un papel fundamental en el desarrollo de moléculas y procesos más eficientes y sostenibles. Solo de esta forma será posible seguir creciendo sin comprometer nuestra calidad de vida y la sostenibilidad del planeta.

Para fomentar el desarrollo de esta nueva química circular ofrecemos proyectos educativos, organizamos cursos de verano para expertos en sostenibilidad y concedemos premios a los investigadores que realizan los principales descubrimientos en esta área. También financiamos proyectos y organizamos congresos centrados en estas cuestiones. De hecho, tenemos un comité que trabaja exclusivamente sobre este tema.

En definitiva, en la IUPAC trabajamos para conectar, inspirar y apoyar a una nueva generación de jóvenes científicos comprometidos con la construcción de un mundo mejor. Este es el objetivo y la visión que me anima todos los días.

Entrevista realizada por **Bernardo Herradón**, investigador del Instituto de Química Orgánica General del CSIC y divulgador de la química.

SI TE INTERESA ESTE TEMA...
Descubre *La tabla periódica*, una recopilación de artículos publicados en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA que ofrece una visión panorámica sobre la historia y evolución de esta obra emblemática y coral





FÍSICA TEÓRICA

UN MISTERIO MATEMÁTICO EN EL CORAZÓN DE LA FÍSICA

Kevin Hartnett | Los progresivos esfuerzos por entender la estructura matemática de la teoría cuántica de campos tendrán profundas consecuencias tanto para la física como para las matemáticas

TODAS LAS ILUSTRACIONES SON DE OLENA SHMAHALO/*QUANTA MAGAZINE*

A lo largo del pasado siglo, la teoría cuántica de campos ha demostrado ser la teoría física más amplia y exitosa jamás inventada. En realidad, se trata de un término genérico bajo el que se agrupan muchas teorías cuánticas de campos concretas, del mismo modo que el término «forma geométrica» engloba ejemplos como el cuadrado y el círculo. La más famosa de esas teorías es el modelo estándar de la física de partículas, un marco conceptual muy útil y que según David Tong, físico de la Universidad de Cambridge, «puede explicar a nivel fundamental todos y cada uno de los experimentos realizados hasta la fecha».

Pero parece claro que la teoría cuántica de campos está incompleta. Ni los físicos ni los matemáticos saben exactamente qué es lo que convierte a una teoría en una teoría cuántica de campos. Aunque vislumbran retazos de la imagen completa, aún no logran distinguirla con nitidez. «Hay varios indicios de que podría existir una forma mejor de concebir la teoría cuántica de campos», afirma Nathan Seiberg, físico del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. «Es como un animal que pudiéramos tocar desde distintos ángulos, pero sin verlo entero.»

Las matemáticas, que exigen coherencia interna y atención al más mínimo detalle, son el lenguaje que podría servir para completar la teoría cuántica de campos. Si aprendiéramos a describir esa teoría con el mismo rigor con el que están caracterizados otros objetos matemáticos, es probable que obtuviéramos una imagen más cabal del mundo físico. Según Robbert Dijkgraaf, director del Instituto de Estudios Avanzados, «si entendiésemos adecuadamente los aspectos matemáticos de la teoría cuántica de campos, podríamos resolver muchos problemas abiertos en física, quizás incluso el de la cuantización de la gravedad».

Pero esta no es una vía de sentido único. Durante milenios, el mundo físico ha sido la gran musa de las matemáticas. Los antiguos griegos inventaron la trigonometría para estudiar los movimientos de los astros, aunque las matemáticas la transformaron en una materia con definiciones y reglas que hoy aprendemos sin ninguna referencia a sus orígenes celestes. Casi dos mil años más tarde, Isaac Newton quería entender las leyes de Kepler del movimiento planetario y buscó una manera rigurosa de pensar en los cambios infinitesimales. Sus ideas, junto a las

EN SÍNTESIS

La teoría cuántica de campos, un término genérico que agrupa teorías como el modelo estándar de la física de partículas, ha demostrado ser la teoría física más amplia y exitosa jamás concebida.

Sin embargo, la teoría cuántica de campos está incompleta, y los matemáticos se afanan por comprender sus propiedades básicas y definirlas con el mismo rigor que caracteriza a otros objetos matemáticos.

Una formulación matemática completa de la teoría cuántica de campos podría tener grandes repercusiones matemáticas y acercar a los físicos a su objetivo último: una descripción exhaustiva de la realidad.

contribuciones de Gottfried Wilhelm Leibniz, dieron origen al cálculo infinitesimal, que las matemáticas adoptaron y mejoraron, y sin el que hoy prácticamente no podrían existir.

Ahora, los matemáticos pretenden hacer lo mismo con la teoría cuántica de campos: tomar las ideas, objetos y técnicas desarrolladas por los físicos para estudiar las partículas elementales e incorporarlas al cuerpo de las matemáticas. Y eso implica definir los aspectos básicos de la teoría cuántica de campos, para que los futuros matemáticos no tengan que preocuparse del contexto físico en el que surgió la teoría.

Esos esfuerzos prometen una gran recompensa. Las matemáticas prosperan cuando encuentran nuevos objetos que explorar y nuevas estructuras que reflejen algunas de las relaciones más importantes entre números, ecuaciones y formas. Y la teoría cuántica de campos ofrece ambas cosas. «La propia física, como estructura, es extremadamente profunda y a menudo proporciona una mejor manera de pensar en las cuestiones matemáticas que nos interesan, una forma más conveniente de organizarlas», indica David Ben-Zvi, matemático de la Universidad de Texas en Austin.

Durante al menos cuarenta años, la teoría cuántica de campos ha tentado a los matemáticos con ideas que investigar. Pero hasta hace poco no han comenzado a entender algunos de sus objetos básicos, abstrayéndolos del mundo de la física de partículas y convirtiéndolos en objetos matemáticos de pleno derecho. Aun así, solo han dado los primeros pasos. «Aunque no podemos saberlo de antemano, confío en que estemos viendo solo la punta del iceberg», comenta Greg Moore, físico de

la Universidad Rutgers de Nueva Jersey. «Si los matemáticos consiguieran comprenderla [la teoría cuántica de campos], realizarían grandes avances en su disciplina.»

Campos perpetuos

Solemos pensar que el universo está hecho de partículas fundamentales, como los electrones, los quarks o los fotones. Pero hace tiempo que la física superó esta imagen: ahora, los expertos consideran que el sustrato último de la realidad no son las partículas, sino unos objetos llamados «campos cuánticos».

Esos campos se extienden a través del espaciotiempo. Los hay de muchos tipos y fluctúan como la superficie de un océano. A medida que los campos evolucionan e interaccionan entre sí, las partículas emergen de ellos y a ellos regresan, igual que la efímera espuma de una ola. «Las partículas no son objetos que estén ahí siempre», subraya Tong. «Lo que hay es un baile de campos.»

Para entender los campos cuánticos, lo más sencillo es empezar con un campo clásico. Imaginemos que medimos la temperatura en cada punto de la superficie de la Tierra. Combinando los infinitos puntos en los que podemos tomar medidas con los resultados de estas, obtenemos un campo, un objeto geométrico que contiene toda la información sobre la temperatura terrestre.

En general, nos topamos con campos siempre que consideramos alguna cantidad que puede medirse a lo largo de un espacio de forma unívoca y con resolución infinita. «Podemos hacer preguntas independientes acerca de lo que ocurre en cada punto del espaciotiempo, como cuánto vale el campo eléctrico aquí o allá», explica Davide Gaiotto, físico del Instituto Perimeter de Física Teórica de Ontario.

Los campos cuánticos aparecen cuando medimos propiedades cuánticas, como la energía de un electrón, en cada punto del espacio y del tiempo. Pero estos campos difieren de manera fundamental de sus homólogos clásicos. Mientras que la temperatura en cada punto de la Tierra es la que es, con independencia de si la medimos o no, los electrones no tienen posiciones definidas hasta que los observamos. Antes de eso, sus posiciones solo pueden describirse de forma probabilística, asignando a cada punto del espacio valores que representan la probabilidad de encontrar el electrón allí y no en otro lugar.

Podríamos decir que, hasta que los detectamos, los electrones están en todas partes y en ninguna. «La mayoría de las cosas con las que nos encontramos en física no son objetos», incide Dijkgraaf, «sino algo que habita en cada punto del espacio y del tiempo».

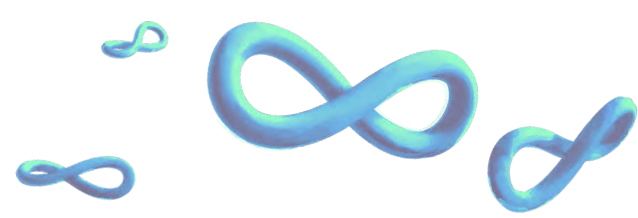
Las teorías cuánticas de campos poseen una serie de reglas llamadas funciones de correlación, que explican la relación que existe entre los valores de un campo en distintos puntos. Además, cada teoría cuántica de campos describe la física en un número concreto de dimensiones. Las definidas en dos dimensiones suelen ser útiles para explicar el comportamiento de materiales como los aislantes. Las teorías en seis dimensiones son especialmente relevantes en teoría de cuerdas. Y las teorías cuánticas de campos en cuatro dimensiones describen la física en nuestro universo tetradimensional. El modelo estándar de la física de partículas pertenece a este último tipo y puede considerarse la teoría cuántica de campos más importante, ya que es la que mejor describe el universo.

Conocemos doce partículas fundamentales, cada una asociada a su propio campo cuántico. A esos doce campos, el modelo estándar añade otros cuatro, que transmiten tres de las cuatro fuerzas fundamentales: uno para el electromagnetismo, otro para la interacción nuclear fuerte y dos más para la interacción nuclear débil. Y a todos ellos se suma el campo asociado al bosón de Higgs. La teoría combina estos 17 campos en una única ecuación que describe cómo interaccionan entre sí. Las partículas elementales aparecen como fluctuaciones de sus respectivos campos cuánticos, y de esta manera todo el mundo físico emerge ante nuestros ojos.

Por extraño que parezca, en la década de 1930 los físicos se dieron cuenta de que basar la física en los campos, en vez de en las partículas, resolvía algunas de las inconsistencias más apremiantes de la disciplina, desde problemas relacionados con la causalidad hasta el hecho de que las partículas no perduren para siempre. Y también explicaba una regularidad aparentemente inverosímil del mundo físico.

«Todas las partículas del mismo tipo son iguales en cualquier lugar del universo», señala Tong. «Si generamos un nuevo protón en el Gran Colisionador de Hadrones, será idéntico a otro que lleve viajando diez mil millones de años. Eso requiere una explicación». Y la teoría cuántica de campos la aporta: todos los protones son fluctuaciones del mismo campo del protón (o, si mirásemos más de cerca, de los campos asociados a los quarks que componen un protón).

Pero el poder explicativo de la teoría cuántica de campos tiene un alto coste matemático. «Las teorías cuánticas de campos son, con diferencia, los objetos más complicados conocidos en matemáticas, hasta el punto de que los matemáticos no saben cómo darles sentido», señala Tong. «Son matemáticas que aún no se han inventado.»



Demasiados infinitos

Pero ¿cuál es la causa de que las teorías cuánticas de campos resulten tan complicadas para los matemáticos? En una palabra, el infinito.

Cuando medimos un campo cuántico en un punto, el resultado no es solo un conjunto de números, como las coordenadas y la temperatura: en realidad es una matriz, es decir, una tabla de números. Y no una matriz cualquiera, sino una realmente grande, con infinitas filas y columnas, denominada «operador». Eso refleja que el campo cuántico incluye todas las posibles maneras en que puede surgir una partícula a partir del campo. «Una partícula puede tener infinitas posiciones, y eso lleva a que la matriz que describe la medida de la posición, o del momento, también tenga dimensión infinita», explica Kasia Rejzner, de la Universidad de York.

Y, cuando una teoría produce infinitos, su relevancia física queda bajo sospecha, ya que el infinito es solo un concepto y no algo que se pueda medir en los experimentos. Además, eso hace que las teorías sean más difíciles de manejar matemáticamente. Según Alejandra Castro, física de la Universidad de Ámsterdam, «no nos gusta tener un marco conceptual del que resulten infinitos. Eso es lo que nos ha llevado a darnos cuenta de que necesitamos mejorar nuestra compresión matemática del problema».

Las dificultades con el infinito se agudizan cuando los físicos se preguntan cómo interaccionan dos campos cuánticos, por ejemplo, al modelizar los choques de partículas que tienen lugar en el Gran Colisionador de Hadrones. En mecánica clásica, este tipo de cálculos son sencillos: para construir un modelo que describa qué sucede cuando chocan dos bolas de billar, basta con usar los números que especifican el momento lineal de cada bola en el instante de la colisión.

Querríamos hacer algo similar para la interacción entre dos campos cuánticos: multiplicar el operador de dimensión infinita asociado a un campo por el operador del otro en el punto del espaciotiempo en que coinciden. Pero ese cálculo (multiplicar dos objetos de dimensión infinita que están infinitamente próximos) no es sencillo. «Ahí es cuando todo comienza a torcerse», lamenta Rejzner.

Éxito aplastante

Los físicos y los matemáticos no pueden hacer cálculos con infinitos, pero han desarrollado alternativas, formas de aproximar cantidades que permiten sortear el problema. Esas estrategias ofrecen predicciones aproximadas, pero lo bastante precisas, dado que los experimentos tampoco tienen una precisión infinita. Como explica Tong, «podemos hacer experimentos y medir cantidades con trece cifras decimales, y concuerdan [con las predicciones] hasta el último decimal. Es uno de los éxitos más asombrosos de toda la ciencia».

Uno de esos métodos alternativos comienza considerando un campo cuántico al que no le pasa nada. En este escenario (que se conoce como «teoría libre», por estar libre de interacciones), no tenemos que preocuparnos de multiplicar matrices de dimensión infinita porque nada colisiona. Es una situación fácil de describir matemáticamente, aunque no reviste demasiado interés. «Es bastante aburrido, porque se trata de un campo solitario que no interacciona con nada, así que es más bien un ejercicio académico», indica Rejzner.

Pero podemos hacerlo más interesante. Partiendo de la teoría libre, los físicos introducen las interacciones entre los campos, intentando mantener el control matemático de todo el conjunto a medida que esas interacciones van haciéndose más intensas. Esta estrategia se conoce como teoría cuántica de campos perturbativa, ya que consiste en considerar pequeños cambios, o perturbaciones, en un campo libre. El método perturbativo puede aplicarse a campos cuánticos

que no difieran mucho de los campos libres y es muy útil para dar cuenta de los experimentos. «Se obtiene una precisión asombrosa, un acuerdo increíble con los resultados experimentales», enfatiza Rejzner.

Por desgracia, si seguimos aumentando la intensidad de las interacciones, el método perturbativo acaba por fallar: en lugar de producir resultados más y más precisos que reproduzcan cada vez mejor el mundo físico, la precisión comienza a disminuir. Eso indica que, aunque nos ayude a entender los experimentos, el método perturbativo no es la manera correcta de describir el universo. Es eficaz en la práctica, pero presenta problemas teóricos. «No sabemos cómo sumar todas las correcciones para obtener un resultado razonable», detalla Gaiotto.

Hay otro esquema aproximativo que intenta abordar la teoría cuántica de campos de otra forma. En principio, un campo cuántico contiene información con una resolución infinita. Para construir esos campos, los físicos comienzan con una red o retículo y restringen las medidas a los puntos donde se cruzan las líneas de la red. Así, en vez de poder medir el campo cuántico en cualquier lugar, al principio solo pueden hacerlo en un conjunto de puntos separados entre sí por una determinada distancia.

Entonces, los físicos van incrementando la resolución de la red, haciéndola más y más tupida. Así, aumenta el número de puntos donde es posible tomar medidas, y la situación va acercándose a la ideal, en la que podemos medir en cualquier sitio. «La distancia entre puntos se hace muy pequeña y acabamos teniendo un campo continuo», señala Seiberg. En términos matemáticos, el campo cuántico continuo representa el límite de un retículo cada vez más denso.

Los matemáticos están acostumbrados a trabajar con límites y saben cómo demostrar que algunos de ellos existen. Por ejemplo, son capaces de probar que el límite de la serie infinita

$$1/2 + 1/4 + 1/8 + 1/16 + \cdots$$

vale 1. A los físicos les gustaría demostrar que los campos cuánticos son el límite de un retículo infinitamente tupido, pero no saben cómo hacerlo. En palabras de Moore, «no está claro cómo tomar el límite ni cuál es su significado matemático». Los físicos están convencidos de que, al hacer el retículo más y más denso, se van aproximando a la noción ideal de un campo cuántico, dado el excelente acuerdo entre las predicciones de la teoría cuántica de campos y los resultados experimentales. «No hay duda de que esos límites existen realmente, porque el éxito de la teoría cuántica de campos ha sido espectacular», apunta Seiberg. Pero una cosa es tener indicios sólidos de que algo es correcto, y otra muy distinta, demostrarlo de forma concluyente.

Ese grado de imprecisión contrasta con el de otras grandes teorías físicas que la teoría cuántica de campos pretende reemplazar. Las leyes del movimiento de Newton, la mecánica cuántica o las teorías de la relatividad especial y general de Einstein forman parte de esa gran historia que la teoría cuántica de campos aspira a relatar... con la diferencia de que todas ellas admiten una formulación matemática exacta. «La teoría cuántica de campos se ha convertido en un lenguaje casi universal para la física, pero matemáticamente no está en buena forma», afirma Dijkgraaf. Y a algunos físicos eso les da que pensar. «Si toda la estructura reposa sobre conceptos básicos que no comprendemos desde un punto de vista matemático, ¿por qué estamos tan seguros de que describe el mundo? Eso agrava el problema», sentencia Dijkgraaf.

Estímulo externo

Incluso en ese estado incompleto, la teoría cuántica de campos ha dado lugar a un buen número de importantes descubrimientos matemáticos. Lo más habitual es que los físicos, al usar la teoría cuántica de campos, se topen con un cálculo sorprendente que los matemáticos tratan luego de explicar. Tong se refiere a este proceso como «una máquina de generar ideas».

A un nivel básico, los fenómenos físicos guardan una relación muy estrecha con la geometría. Podemos ilustrarlo con un ejemplo: una bola que se mueve sobre una superficie pulida seguirá el camino más corto entre dos puntos cualesquiera, una curva conocida como geodésica. Así, un fenómeno físico sirve para detectar las propiedades geométricas de una superficie.

Reemplacemos ahora la bola por un electrón. Recordemos que, en términos probabilísticos, este existe en toda la superficie. Estudiando el campo cuántico que refleja esas probabilidades, podemos aprender algo acerca de la naturaleza global de la superficie (o variedad, en la jerga matemática), como, por ejemplo, cuántos agujeros tiene. Esta es una pregunta fundamental que quieren responder los matemáticos que trabajan en geometría y en el

campo relacionado de la topología. «Una partícula, aunque esté ahí sin hacer nada, empezará a tener información sobre la topología de la variedad», apunta Tong.

En los últimos años de la década de 1970, físicos y matemáticos comenzaron a aplicar ese enfoque para resolver algunas cuestiones geométricas básicas. A principios de los noventa, Seiberg y Edward Witten, del Instituto de Estudios Avanzados, lo usaron para crear una nueva herramienta matemática (los llamados invariantes de Seiberg-Witten) que transforma los fenómenos cuánticos en un índice que mide aspectos puramente matemáticos de una superficie: si contamos el número de veces que una partícula cuántica se comporta de cierta manera, podremos determinar cuántos agujeros tiene la variedad. Como explica Graeme Segal, matemático de la Universidad de Oxford, «Witten demostró que la teoría cuántica de campos brinda una información totalmente inesperada, pero totalmente precisa, sobre cuestiones geométricas, tornando resolubles problemas que antes eran intratables».

Otro ejemplo del intercambio entre ambas disciplinas ocurrió también a comienzos de los años noventa. Los físicos realizaron ciertos cálculos relacionados con la teoría de cuerdas en dos espacios distintos, basados en reglas matemáticas muy diferentes, y obtuvieron resultados idénticos en ambos casos. Entonces tomaron el relevo los matemáticos, que desarrollaron todo un nuevo campo de investigación en torno a esta equivalencia entre espacios, llamada simetría especular, el cual estudia estas situaciones y muchas otras similares. «Los físicos hicieron esas sorprendentes predicciones, y los matemáticos intentamos probarlas utilizando nuestros propios métodos», detalla Ben-Zvi. «Las predicciones eran extrañas y maravillosas, y casi siempre resultaron correctas.»

Pero, aunque la teoría cuántica de campos ha servido de guía a las matemáticas, sus ideas centrales están casi completamente fuera de esa disciplina. Los matemáticos no entienden las teorías cuánticas de campos lo bastante bien como para usarlas de la misma manera que los polinomios, grupos, variedades u otros objetos matemáticos fundamentales, muchos de los cuales también tuvieron su origen en la física.

Para los físicos, esa relación distante con las matemáticas constituye una señal de que aún hay muchas cosas que no entienden en la teoría que ellos mismos crearon. «El resto de ideas que ha usado la física en los últimos siglos han encontrado su lugar natural en las matemáticas», indica Seiberg. «Está claro que no ocurre lo mismo con la teoría cuántica de campos.»

Y los matemáticos creen que la relación entre la teoría cuántica de campos y las matemáticas debería ser más profunda, en vez de limitarse a interacciones ocasionales. La razón es que las teorías cuánticas de campos poseen muchas simetrías, estructuras subyacentes que dictan cómo se relacionan entre sí los valores de un campo en distintos puntos, o las diferentes componentes de un mismo campo. Esas simetrías tienen un significado físico (reflejan la conservación de cantidades como la energía a medida que evolucionan los campos cuánticos), pero también son interesantes desde un punto de vista puramente matemático. «Los matemáticos pueden fijarse en una determinada simetría, y nosotros ponerla en un contexto físico. Eso crea un bello puente entre ambas disciplinas», explica Castro.

Los matemáticos ya emplean las simetrías y otros aspectos de la geometría para investigar todo tipo de problemas, desde soluciones a distintos tipos de ecuaciones hasta la distribución de los números primos. A menudo, la geometría contiene respuestas a preguntas sobre números. La teoría cuántica de campos ofrece a los matemáticos un nuevo y rico tipo de objetos geométricos; si lograran dominarlos, quién sabe lo que serían capaces de hacer. «Hasta cierto punto, solo estamos jugando con la teoría cuántica de campos», reflexiona Dan Freed, matemático de la Universidad de Texas en Austin. «Venimos usándola como un estímulo externo, pero sería estupendo que también constituyera uno interno.»

Una base matemática

Los matemáticos no admiten nuevas materias a la ligera. Muchos conceptos básicos tuvieron que pasar por largos períodos de prueba hasta encontrar su lugar canónico en la disciplina.

Entender los aspectos matemáticos de la teoría cuántica de campos nos daría una imagen más completa del mundo físico

Pensemos en los números reales, las infinitas rayitas de la recta numérica. Hubo que utilizarlos durante casi dos mil años para llegar a un acuerdo sobre cómo definirlos. Por fin, en la década de 1850, los matemáticos se decidieron por un enunciado de tres palabras que describe los números reales como un «cuerpo ordenado completo»: forman un cuerpo (lo que para los matemáticos significa que siguen las reglas de la aritmética) que, además, es completo porque no contiene huecos y está ordenado porque siempre podemos determinar si un número real es mayor o menor que otro. «Costó mucho llegar a esas tres palabras», subraya Freed.

Para convertir la teoría cuántica de campos en un estímulo interno (una herramienta que sirva a sus propios objetivos), los matemáticos querrían hacer lo mismo que con los números reales: construir una lista de propiedades bien definidas que tuviera que satisfacer cualquier campo cuántico.

Uno de los investigadores que más ha contribuido a la tarea de traducir partes de la teoría cuántica de campos al lenguaje de las matemáticas es Kevin Costello, del Instituto Perimeter. En 2016 escribió junto con Owen Gwilliam un libro de texto que proporcionó una base matemática sólida a la teoría cuántica de campos perturbativa, incluido un formalismo para trabajar con las cantidades infinitas que surgen a medida que aumentamos el número de interacciones. Ese trabajo continuaba un desarrollo previo de la década de 2000, la teoría cuántica de campos algebraica, que perseguía fines similares y que examinó Rejzner en un libro de 2016. Aunque la teoría cuántica de campos perturbativa siga sin describir realmente el universo, ahora los matemáticos saben, al menos, cómo manejar los infinitos sin sentido físico que genera. Según Moore, la contribución de Costello «es muy imaginativa y profunda. Ha puesto la teoría [perturbativa] en un nuevo marco que permite hacer matemáticas rigurosas».

Costello explica que su motivación para escribir el libro fue hacer más coherente la teoría cuántica de campos perturbativa. «Encontraba que ciertos métodos usados por los físicos carecían de justificación y eran *ad hoc*. Yo quería algo más redondo, con lo que pudiera trabajar un matemático.»

Al especificar cómo funciona exactamente la teoría de perturbaciones, Costello ha creado una base sobre la que físicos y matemáticos pueden construir nuevas teorías cuánticas de campos que cumplan los requisitos fijados en ese nuevo marco. Otros investigadores del campo han adoptado enseguida su idea. «Costello ha logrado que mucha gente joven se ponga a trabajar en este tema. [Su libro] ha tenido influencia», opina Freed.

Costello también ha estado trabajando para definir qué es una teoría cuántica de campos. De forma esquemática, un campo cuántico requiere un espacio geométrico donde se puedan realizar observaciones en cada punto, combinado con funciones de correlación que expresen cómo se relacionan las observaciones hechas en distintos puntos. El trabajo de Costello describe las propiedades que debe satisfacer un conjunto de funciones de correlación para servir como base de una teoría cuántica de campos.

Las teorías cuánticas de campos más habituales, como el modelo estándar de la física de partículas, tienen características adicionales que no tienen por qué estar presentes en todas las teorías de este tipo. Las que carecen de esos aspectos seguramente describen propiedades aún por descubrir y que podrían ayudar a los físicos a dar cuenta de fenómenos que no explica el modelo estándar. Si nuestra idea de una teoría cuántica de campos se ajusta demasiado a las versiones que ya conocemos, quizá tengamos problemas para imaginar otras posibilidades necesarias.

«Hay un gran foco bajo el que hallamos algunas teorías cuánticas de campos [como el modelo estándar], y alrededor existe una zona de oscuridad [con otras teorías] que no sabemos cómo definir, aunque sepamos que están ahí», explica Gaiotto. Costello ha iluminado parte de ese espacio sombrío con sus definiciones de los campos cuánticos, que le han llevado a descubrir dos nuevas y sorprendentes teorías. Ninguna de ellas

describe nuestro universo de cuatro dimensiones, pero ambas satisfacen los requisitos básicos de un espacio geométrico equipado con funciones de correlación. El hallazgo de estas teorías a partir del pensamiento puro recuerda a lo que sucede con las formas geométricas: las primeras que uno descubre son las que están presentes en el mundo real, pero, una vez que tenemos una definición general de «forma», es posible usarla para hallar ejemplos sin relevancia física.

Si los matemáticos pudiesen determinar el espacio completo de posibilidades para las teorías cuánticas de campos (todas las posibles maneras de satisfacer una definición general que implique funciones de correlación), los físicos podrían aprovecharlo para encontrar teorías concretas que expliquen las cuestiones físicas que más les interesan. «Quiero conocer el espacio de todas las teorías cuánticas de campos para saber qué es la gravedad cuántica», incide Castro.

Un reto multigeneracional

Aún queda mucho camino por recorrer. Hasta ahora, todas las teorías cuánticas de campos con una descripción matemática completa se basan en simplificaciones que facilitan su tratamiento matemático. Una forma de atacar el problema que se usa desde hace décadas es estudiar teorías definidas en dos dimensiones, en lugar de cuatro. Un equipo formado por Colin Guillarmou, Antti Kupiainen, Rémi Rhodes y Vincent Vargas logró hace poco fijar todos los detalles matemáticos de una importante teoría cuántica de campos bidimensional, la teoría de Liouville.

Otra simplificación consiste en asumir que los campos cuánticos tienen más simetrías aparte de las que vemos en la naturaleza, lo que los hace más manejables desde un punto de vista matemático. Este enfoque es el que explotan las teorías «supersimétricas» y las teorías cuánticas de campos «topológicas».

El siguiente paso, mucho más complejo, será eliminar las simplificaciones y obtener una descripción matemática de las teorías cuánticas de campos que se ajuste mejor al mundo físico: un universo continuo de cuatro dimensiones en el que todas las interacciones ocurren a la vez. «Resulta muy embarazoso que no haya una sola teoría cuántica de campos en cuatro dimensiones que sepamos describir de manera no perturbativa», lamenta Rejzner. «Es un problema muy difícil, y parece que su resolución requerirá más de una o dos generaciones de matemáticos y físicos.»

Pero eso no impide que sean ambiciosos. Para los matemáticos, la teoría cuántica de campos proporciona una clase de objetos tan rica como pudieran desear. Definir las propiedades que comparten todas las teorías cuánticas de campos seguramente requerirá unificar dos pilares de las matemáticas: el análisis, que explica cómo controlar los infinitos, y la geometría, que proporciona un lenguaje para hablar de la simetría. Según Dijkgraaf, «es un problema fascinante desde el punto de vista matemático, porque combina dos grandes ideas».

No hay manera de saber qué descubrimientos nos aguardan una vez que los matemáticos logren comprender la teoría cuántica de campos. Hace tiempo, definieron las propiedades características de otros objetos, como las variedades y los grupos, que ahora aparecen en cada rincón de las matemáticas. Cuando introdujeron esas definiciones, resultaba imposible anticipar todas sus ramificaciones matemáticas, y la teoría cuántica de campos es al menos igual de prometedora para la disciplina. «Suelo decir que los físicos no tienen por qué saber todo, pero la física sí», comparte Ben-Zvi. «Haciéndole las preguntas correctas, desvela los fenómenos que buscamos los matemáticos.»

En cuanto a los físicos, una formulación matemática completa de la teoría cuántica de campos es la otra cara de su objetivo último: una descripción exhaustiva de la realidad. «Siento que hay una estructura intelectual que lo incluye todo, y quizá comprenda toda la física», afirma Seiberg. Ya solo falta que los matemáticos la descubran.



Kevin Hartnett es redactor de *Quanta Magazine*.

Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia.



EN NUESTRO ARCHIVO

Teorías cuánticas de campos topológicas. José Manuel Fernández de Labastida en *IyC*, julio de 1995.

Los problemas cuánticos inspiran nuevas matemáticas. Robbert Dijkgraaf en *IyC*, septiembre de 2017.

Un nuevo mapa de las partículas y las interacciones. Natalie Wolchover, Samuel Velasco y Lucy Reading-Ikkanda en *IyC*, septiembre de 2021.



EVOLUCIÓN

MAREAS MICROBIANAS TÓXICAS

Chris Mays, Vivi Vajda y Stephen McLoughlin | Las algas y las bacterias sofocaron los ríos y los lagos durante la mayor extinción que ha asolado el planeta. Sirva de seria advertencia

ANTES DE LA GRAN EXTINCIÓN de finales del Pérmico, los bosques pantanosos eran abundantes (*izquierda*). Después de aquel episodio, el crecimiento desaforado de algas y bacterias estancó la recuperación de los ecosistemas (*derecha*).

Al amanecer de un día de verano, a una hora en automóvil de Sídney, comenzamos a trepar en dirección norte por la base de un acantilado. Andábamos en busca de rocas que contuviesen indicios del capítulo más funesto de la historia del planeta.

La vida en la Tierra ha atravesado trances aterradores a lo largo de 4000 millones de años, unos episodios en los que las especies desaparecidas superaron con creces a las sobrevivientes. La peor crisis de todas tuvo lugar hace 252 millones de años, a finales del período Pérmico. Las condiciones imperantes entonces fueron las más adversas que haya soportado jamás la fauna. Los incendios y la sequía asolaron la tierra firme y los mares se convirtieron en un caldo caliente y asfixiante.

Muy pocos seres son capaces de sobrevivir en un entorno infernal como ese. Más del 70 por ciento de las especies terrestres y más del 80 por ciento de las marinas desaparecieron, de ahí que algunos paleontólogos hayan llamado al episodio la Gran Mortandad.

El cataclismo quedó grabado en rocas esparcidas por todo el planeta, pero quizás en ningún otro lugar haya quedado mejor plasmado que en las costas rocosas del este de Australia, donde nos hallábamos ese día de verano. A media mañana dimos con nuestro objetivo: un afloramiento de carbón encajado en la pared del acantilado. El sedimentólogo Christopher Fielding, de la Universidad de Connecticut, colaborador nuestro desde hace tiempo, ha reconocido recientemente en esas rocas los sedimentos fluviales y lacustres depositados durante el episodio acaecido a finales del Pérmico. Bajo su dirección hemos escrutado los sedimentos en busca de vestigios fósiles de los contados supervivientes de aquella gran extinción.

Desde nuestra ventajosa posición sobre el afloramiento contemplamos el primer indicio de la antigua devastación: la ausencia de estratos carboníferos en las altas paredes de arenisca que se alzaban por encima de nuestras cabezas. En la temprana excursión por el lugar vimos numerosos estratos de carbón entre las areniscas y las argilitas de las capas más bajas, que se remontan al Pérmico superior, hace entre 259 y 252 millones de años. Representan los restos compactados de los bosques pantanosos que en aquella época se extendían por el sur del supercontinente Gondwana formando un vasto cinturón. Pero las rocas suprayacentes, que corresponden al período siguiente, el Triásico inferior (hace entre 252 y 247 millones de años), no albergaban ni rastro de carbón. De hecho, jamás se ha encontrado una sola veta de dicho material en rocas de esa antigüedad en ningún lugar del planeta. Tales estratos son, en cambio, el testimonio de la lenta sedimentación de arena y arcillas en el lecho de los ríos y los lagos, en apariencia no alterada por ninguna forma de vida.

Ignorado tradicionalmente por la escasez de combustibles fósiles que pudieran explotarse, este llamado «lapso sin carbón» se ha erigido hace poco en la clave para conocer la historia de la vida en la Tierra. Ahora sabemos que era un síntoma de un planeta enfermo. Al final del Pérmico no solo se desmoronaron los ecosistemas terrestres y marinos; también las aguas continentales quedaron desoladas. En estudios recientes hemos visto que, a medida que la temperatura del planeta fue ascendiendo en las postrimerías de ese período geológico, las floraciones de bacterias y algas sofocaron los ríos y los lagos haciendo de ellos lugares prácticamente inhabitables. Esas conclusiones contribuyen a explicar por qué la extinción subsecuente fue tan devastadora y suscitan inquietud por el futuro de la biodiversidad actual, en este mundo en franco calentamiento.

EN SÍNTESIS

Los ríos y los lagos habían servido como refugio para la fauna durante las grandes extinciones del pasado, o eso se pensaba.

Recientes análisis geológicos y paleontológicos de los estratos pertenecientes a la transición del Pérmico al Triásico, marcada por la mayor extinción conocida, rebaten esa idea.

El calentamiento atmosférico y el aumento del CO_2, aunados con la escorrentía de los nutrientes del suelo calcinado por los incendios, desataron una eutrofización vasta y persistente que envenenó las aguas interiores y costeras.

Hoy la frecuencia y la escala de esos fenómenos va en alza, lo que deberíamos tomar como una seria advertencia.

Tierra quemada

A medida que el sol se encumbraba en el cielo, comenzamos a sentir su calor inclemente. En

unas pocas horas nos las apañamos para recolectar fósiles y rocas hasta que las condiciones en el afloramiento se hicieron insoportables. En aquel momento, a inicios del verano de 2018, la temporada de campo nos pareció más cálida que la anterior. Quizá lo fuese realmente o tal vez influyese que poco antes habíamos regresado del frío Estocolmo, donde trabajamos en el Museo de Historia Natural de Suecia. Sea como fuere, al mediodía buscamos una sombra bajo la que descansar un par de horas y meditar acerca de lo habíamos visto allí.

Los fragmentos de carbón recogidos contenían casi en exclusiva restos compactados de hojas, raíces y madera pertenecientes a *Glossopteris*, un género de árboles que entonces abundaban en los pantanos y humedales y se transformaron fácilmente en turba, precursora del carbón. Justo por encima de los estratos carboníferos no hallamos fósil alguno, al menos a simple vista. En todos los afloramientos de similar antigüedad cercanos a Sídney se observa una zona vacía, desprovista de restos fosilizados. No contiene ni hojas ni raíces, a duras penas fósiles de ningún tipo, con una notoria excepción: galerías simples y sinuosas, excavadas y cegadas después por la arena, de hasta dos metros de longitud. A juzgar por sus dimensiones y su forma, pensamos que debieron de ser obra de pequeños reptiles mamiferoides, de la talla de un topillo o un topo. Los laboriosos artífices habían excavado aquellas madrigueras en la zona fangosa carente de fósiles, de lo que se colige que sobrevivieron a la catástrofe que marcó el final del Pérmico. El secreto del éxito probablemente resida en su modo de vida: el subsuelo les ofreció abrigo en un momento en que la superficie había quedado arrasada.

Todos los seres vivos hemos de plegarnos a las fuerzas de la naturaleza. Al igual que aquellos remotos ancestros supervivientes, durante aquella jornada de trabajo a la intemperie buscamos alivio del calor. Por suerte solo tuvimos que permanecer a resguardo unas horas antes de salir de nuevo. ¿Pero qué sucedería si las temperaturas sofocantes durasen meses, años o acaso milenios?

Poco después de que el sol cayera a poniente proyectando la sombra del acantilado sobre nosotros, dimos por acabado el día no sin antes tomar nuevas muestras de rocas que estudiaría-


CHRIS MAYS

EL ÚLTIMO DEPÓSITO de carbón del Pérmico, visible en forma de una franja negra en los estratos rocosos, está cubierto por los acantilados de arenisca del Triásico inferior, carentes virtualmente de fósiles.

mos de vuelta en el laboratorio. La mayoría de los paleontólogos cree que la ausencia de fósiles visibles, como sucede en la «zona muerta» que señala la extinción masiva, no da para mucho más que una excursión breve. Nosotros sospechábamos que el relato completo permanecía oculto en los vestigios fosilizados, imperceptibles a simple vista.

Reunimos las muestras de aquel día con otras rocas contemporáneas que habíamos recolectado antes en las inmediaciones de Sídney y las dividimos en tres lotes. El primero lo enviamos a Jim Crowley, de la Universidad Estatal en Boise, y a Bob Nicoll, de Geoscience Australia, con objeto de que hicieran cálculos cronométricos precisos del episodio de extinción. El segundo lo reser-

Floraciones mortales

Hace tiempo que sabemos que los ecosistemas terrestres y marinos devinieron lugares inhóspitos a finales del período Pérmico a consecuencia del calentamiento planetario. Los análisis de las rocas fosilíferas de la cuenca de Sídney han mostrado que los ríos y los lagos, considerados hasta ahora los únicos refugios seguros en aquella época apocalíptica, se convirtieron también en entornos mortales, sofocados por las floraciones tóxicas de algas y bacterias. El desmoronamiento de esos ambientes acuáticos frenó drásticamente la recuperación de la vida en todo el planeta.

La gran extinción de finales del Pérmico

El alza sin freno de las concentraciones de CO_2 y las temperaturas acabó con más del 70% de las especies terrestres y del 80% de las marinas.

El episodio climático del Smithiano y el Spathiano

Tuvieron que transcurrir casi tres millones de años antes de que la temperatura y el CO_2 se moderaran y posibilitaran la recuperación ecológica.

Zona muerta

Pérmico
Millones de años: 253 252 251 250 249 248
Triásico

Antes del episodio de extinción

En los humedales dominaba un género de árboles hoy extinto, *Glossopteris*. En el sotobosque predominaban los helechos y los musgos, entre otros vegetales.

El derrumbe ecológico

Los vastos incendios y la desaparición de los bosques provocaron el ascenso del nivel freático y la acumulación del agua en las tierras bajas. Alimentadas por el flujo de nutrientes, las algas y las bacterias de los ecosistemas acuáticos continentales proliferaron sin control.

Recuperación frustrada

Las floraciones de algas y bacterias agotaron el oxígeno en los lagos y los ríos y los llenaron de subproductos metabólicos tóxicos, lo que seguramente retrasó millones de años la recuperación de los ecosistemas de las aguas continentales.

Recuperación reanudada

El enfriamiento atmosférico trajo consigo cambios en la vegetación, entre ellos la recuperación de las plantas con semillas (espermatófitas) y el consecuente retorno de la fauna. Casi tres millones de años después de que el planeta quedara inmerso en un infierno, la vida comenzó a prosperar de nuevo.

Temperatura y niveles de CO_2

Moderados | Muy altos | Altos | Moderados

Material orgánico dominante (en cada etapa, según los vestigios fósiles)

Más abundante
Menos abundante

Bosque húmedo | Algas, Bacterias | Matorral seco | Bosque seco

Fases ecológicas reconstruidas

FUENTE: «LETHAL MICROBIAL BLOOMS DELAYED FRESHWATER ECOSYSTEM RECOVERY FOLLOWING THE END-PERMIAN EXTINCTION», CHRIS MAYS ET AL. EN *NATURE COMMUNICATIONS*, VOL. 12, 17 DE SEPTIEMBRE DE 2021 (*material de referencia*); JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

vamos para nuestra colega Tracy Frank, de la Universidad de Connecticut, a fin de que calculase las temperaturas predominantes durante el Pérmico superior. Y el tercero nos lo llevamos nosotros al Museo de Historia Natural de Suecia, donde lo examinamos en busca de microfósiles de esporas vegetales y polen, así como de algas microbianas y bacterias, con la idea de elaborar un relato prolijo del colapso ecológico y de la recuperación.

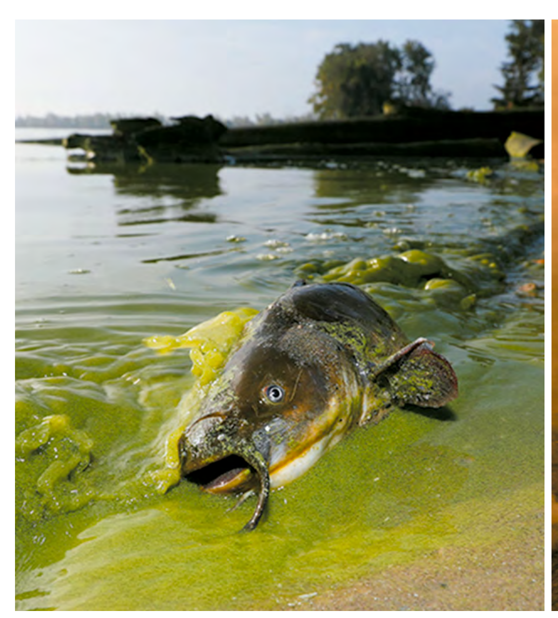
El cataclismo quedó grabado en rocas esparcidas por toda la Tierra

Como preveíamos, los análisis de los microfósiles indicaron que la abundancia de esporas vegetales y de polen decayó abruptamente en la parte situada justo por encima del depósito de carbón, a finales del Pérmico, como consecuencia de la desforestación casi absoluta del terreno. Pero para sorpresa nuestra, descubrimos que las algas y las bacterias habían proliferado poco después de la extinción, hasta el punto de infestar los ecosistemas acuáticos continentales con una marea venenosa. De hecho, alcanzaron concentraciones propias de las floraciones microbianas actuales, como las insólitas mareas tóxicas que afectaron el lago Erie en 2011 y 2014. Ese crecimiento explosivo, conocido como eutrofización, agota el oxígeno disuelto en el agua, y los incontables microbios liberan subproductos tóxicos de su metabolismo que causan la mortandad de la fauna acuática. En la estela de la devastación ocurrida a finales del Pérmico, los seres vivos más diminutos heredaron los ríos y los lagos, en cuyas aguas crearon un nuevo régimen. Nos preguntamos cómo proliferaron hasta ese extremo y las consecuencias de aquel crecimiento desmedido. Pero para dar respuestas se necesitaban más datos.

Los análisis de las otras dos muestras aportaron nuevas pistas. Los cálculos de la antigüedad revelaron que el colapso ecológico coincidió con los primeros fragores de una serie de erupciones volcánicas de magnitud colosal que afectaron a una extensa provincia ígnea conocida como las Trampas Siberianas, en la actual Rusia. El término «volcánico» parece inapropiado porque se queda corto; el volumen de magma expulsado por las trampas alcanzó varios millones de kilómetros cúbicos, algo difícil de imaginar. La provincia de las Trampas Siberianas es a un volcán lo que un tsunami es a una ola en la bañera. Los estudios señalan de forma recurrente que ese episodio ígneo fue el culpable último de la gran extinción del Pérmico. En buena parte, lo muestra la composición de las rocas de esa región. Las situadas bajo Siberia, anteriores al episodio, eran ricas en carbón, petróleo y gas; pero cuando la erupción se desató, el calor del magma ascendente vaporizó los hidrocarburos en gases de efecto invernadero que ascendieron hasta la atmósfera. Las concentraciones de dióxido de carbono se multiplicaron por seis.

El calendario concuerda con los nuevos cálculos geoquímicos de la temperatura hechos por Tracy, que revelaron un aumento de 10 a 14 grados centígrados en la región de Sídney. Los cálculos cronológicos también acotaron la duración de los cambios observados en esa región de Australia: el calentamiento se agudizó, y en pocas decenas de miles de años los ecosistemas se derrumbaron. Ese cambio de condiciones, rápido en la escala de tiempo geológica, condenó a la fauna de las regiones templadas a la extinción y empujó a los sobrevivientes a vivir parte del tiempo bajo el suelo, donde la temperatura no era tan alta. Simultáneamente desencadenó las extensas floraciones microbianas que descubrimos estudiando los microfósiles: habían dado comienzo las enormes mareas tóxicas.

Estas se alimentaban de tres ingredientes básicos: dióxido de carbono, temperatura y nutrientes, todos en abundancia. En el transcurso del episodio del Pérmico, las Trampas Siberianas aportaron los dos primeros. El tercero provino de la desforestación súbita: con la desaparición de la masa arbórea, el suelo que había permanecido retenido por las raíces fue arrastrado sin freno hasta los ríos y los lagos, donde fueron a parar todos los nutrientes que las algas y las bacterias acuáticas precisaban para crecer. Sin peces ni invertebrados que se alimentaran de ellas y mantuviesen controlada su abundancia, proliferaron con altibajos durante los siguientes 300.000 años. Una vez que el nuevo reino consolidó su dominio, sus integrantes alcanzaron concentraciones tan elevadas en el agua que la envenenaron e impidieron que la fauna acuática





ANDY MORRISON/THE BLADE/AP PHOTO (*izquierda*); JONNE RORIZ/BLOOMBERG CREATIVE/GETTY IMAGES (*derecha*)

LAS MAREAS TÓXICAS que afectan a los ecosistemas de agua dulce, como el lago Erie (*izquierda*), están aumentando en paralelo con el ascenso del dióxido de carbono, de la temperatura y de la escorrentía de nutrientes. Los incendios forestales como los que azotaron los humedales del Pantanal brasileño (*derecha*) no hacen sino empeorar el problema.

recobrase la diversidad previa a la extinción, tal vez por espacio de millones de años. Acabábamos de descubrir que las aguas continentales, consideradas el último refugio posible en aquella época apocalíptica, no lo fueron en absoluto.

Un síntoma recurrente

El escritor Terry Pratchett escribió una vez acerca de las revoluciones: «Siempre vuelven a ocurrir. Por eso se las llama así». La del final del Pérmico fue singularmente calamitosa para la vida, pero en la historia de la Tierra solo debió ser el último de una serie de episodios de extinción causados por el calentamiento. Si las condiciones ambientales que propiciaron los florecimientos microbianos del Pérmico fuesen características de las extinciones masivas, otros desastres ecológicos del pasado habrían dejado huellas parecidas. Es más, casi todas las grandes extinciones de la prehistoria parecen haber ido ligadas al calentamiento rápido y duradero causado por el CO_2. Uno esperaría ver en otros episodios restos parecidos de actividad microbiana, aunque no tan marcados.

Gracias a los pocos datos publicados sobre los sistemas de aguas continentales durante otras extinciones masivas, dimos con esa pauta. Pero el mejor indicio de que estábamos ante algo importante surgió cuando colocamos el episodio del Pérmico-Triásico, junto con los demás, en orden decreciente de intensidad. Las extinciones mostraron lo que parecía una «relación dosis-respuesta». Con ese término suele describirse la reacción de un ser vivo a un estímulo externo, como el causado por un fármaco o un microbio infeccioso. Si el estímulo es la auténtica causa de la reacción, lo lógico es pensar que a mayor dosis, mayor respuesta. Cuando aplicamos ese razonamiento, vimos que la severidad global de esas «infestaciones» microbianas (eutrofizaciones) de los ecosistemas acuáticos continentales realmente parecía haber aumentado en paralelo con la intensidad del calentamiento atmosférico. Los episodios suaves casi no desencadenaron una respuesta microbiana, mientras que los fuertes aumentos de temperatura a finales del Pérmico provocaron una pandemia metafórica de microbios acuáticos.

Enseguida comparamos esa pauta con la extinción masiva más famosa de todas: el episodio de finales del Cretácico, ocurrido hace 66 millones de años, que provocó la desaparición de la mayoría de los vertebrados de gran tamaño, entre ellos los dinosaurios no aviares. En cuestión de días, algunos de los animales más asombrosos que han hollado la tierra, nadado en los mares o surcado los cielos desaparecieron para siempre. Sabemos que en ese tiempo hubo erupciones volcánicas colosales, pero la mayoría de las extinciones motivadas por tal episodio suelen atribuirse a un

asteroide de al menos una decena de kilómetros de diámetro que impactó a una velocidad de hasta 20 kilómetros por segundo frente a la costa del México actual. La nube de polvo, cenizas y aerosoles de dimensiones planetarias que levantó debió de detener en seco el crecimiento de los microbios fotosintéticos durante los momentos posteriores. Cuando los rayos del sol se abrieron paso de nuevo hasta la superficie, algunos se multiplicaron, pero su reinado no debió de durar demasiado ni ser muy extenso, seguramente por el escaso aumento del CO_2 y de la temperatura.

Sin una atmósfera tórrida que impulsara su crecimiento, el nuevo orden planetario de los microbios debió de desmoronarse en poco tiempo. Las respuestas biológicas opuestas que observamos en los episodios de extinción causados por el magma y por el asteroide ponen de manifiesto la importancia que la concentración de CO_2 y las temperaturas altas desempeñan en el sostenimiento de las floraciones nocivas de algas y bacterias. Este nexo entre el calentamiento provocado por los gases de efecto invernadero y las mareas microbianas tóxicas es satisfactorio y alarmante a la vez: por un lado, está naciendo una teoría elegante de la extinción masiva en las aguas continentales; pero, por el otro, se constata que causar una pérdida generalizada de biodiversidad sería más sencillo de lo que pensábamos y, según parece, todo comenzaría con la emisión acelerada de CO_2.

En auge

Hoy la humanidad está añadiendo los ingredientes de esa sopa tóxica microbiana en cantidades pródigas. Los dos componentes primordiales, el CO_2 y la temperatura, son subproductos de la civilización moderna desde hace casi doscientos años. La especie humana ha estado convirtiendo con afán los hidrocarburos enterrados en gases de efecto invernadero a un ritmo muy superior al de cualquier volcán. El tercer ingrediente, los nutrientes, lo estamos vertiendo en los cursos y las masas de agua con la escorrentía de los abonos agrícolas, con el suelo erosionado por la tala de los bosques y con los desechos derivados de la nula o la mala gestión de las aguas residuales. Todo ello ha contribuido a un aumento inusitado de los episodios tóxicos de eutrofización, con un coste anual para las pesquerías, para los servicios ecosistémicos (como el agua potable) y para la salud que no cesa de crecer y asciende ya a miles de millones de euros.

Los incendios forestales no harán sino agravar el problema. En un mundo cada vez más cálido, las sequías serán más intensas, y los incendios más frecuentes, hasta en los entornos donde la humedad no escasea, como en los bosques turbosos de Indonesia o los humedales del Pantanal, en América del Sur. Además de aportar a las cuencas más y más nutrientes arrancados del suelo quemado y desnudo por obra de la escorrentía, el fuego lanzará a la atmósfera ingentes cantidades de hollín y de micronutrientes que acabarán depositándose en los mares y las aguas continentales. En estudios recientes se han descubierto floraciones algales en cursos fluviales del oeste de Estados Unidos tras una ola de incendios importantes. En otros lugares, entre las secuelas del verano negro de incendios que asolaron Australia en 2019–2020, figura la detección de extensas floraciones de algas en el mar situado a sotavento del continente.

Los incendios habrían facilitado también el crecimiento de los microbios acuáticos en el pasado remoto. Nuestros análisis de los sedimentos superpuestos sobre las capas de carbón de los alrededores de Sídney han revelado carbón vegetal en abundancia, un claro indicio de la quema generalizada que afectó a los últimos reductos de pantanos carboníferos del Pérmico. Como en los ejemplos actuales, la combinación de la escorrentía y las cenizas dejadas por el fuego también saturó de nutrientes las masas de agua del Pérmico superior y propició la proliferación desmesurada de las bacterias y las algas mortíferas.

Las extinciones en masa prehistóricas dejan lecciones para el presente y para el futuro. Tengamos en cuenta las dos premisas siguientes de las ciencias de la Tierra. La primera es que la atmósfera, la hidrosfera, la geosfera y la biosfera están vinculadas: si una sufre una alteración sustancial, las demás reaccionarán de modos predecibles. La segunda premisa es que dicho principio es hoy tan cierto como antaño. El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) aplicó esa lógica en su evaluación más reciente de las causas y las consecuencias del calentamiento planetario.

A partir de los registros de hielo, rocas y fósiles, ese consorcio integrado por más de 200 científicos ha llegado a la conclusión de que hace más de dos millones de años que el mundo no había conocido niveles de CO_2 como los actuales. En esos períodos del pasado, ¿hasta dónde ascendió

el mar?, ¿cómo influyeron esas condiciones en el ritmo de erosión del suelo?, ¿qué distribución tuvieron los bosques? En suma: ¿cómo afectó el cambio atmosférico a los mares, la tierra y los seres vivos? La sociedad de hoy debería buscar con urgencia respuestas a todas esas preguntas, vista la concentración actual de CO_2, que ya asciende a 415 partes por millón (ppm); por no hablar de las 800 o 900 ppm que indican las previsiones para el año 2100 si la humanidad sigue quemando los combustibles fósiles al ritmo actual. Con el CO_2 creciendo sin freno, hemos de girar la vista atrás en busca de indicios de lo que podría ocurrir. En la situación actual, los récords de los pasados episodios de calentamiento extremo adquieren aún más trascendencia.

La analogía entre el episodio del Pérmico y el actual no se cumple al menos en dos puntos importantes, pero esas discrepancias no son tan tranquilizadoras como nos gustaría. Por un lado, el ritmo de calentamiento probablemente sea distinto. La vida siempre lucha por salir adelante ante los grandes cambios ambientales que ocurren en escalas de tiempo breves, por lo que el episodio de finales del Pérmico, el peor de la historia, tal vez fue más rápido que el calentamiento en curso. Pese a ello, es más probable que el actual sea más veloz. Nuestro equipo y otros han constatado que el aumento de seis veces en el CO_2 acaecido en la crisis del Pérmico-Triásico tuvo lugar a lo largo de decenas de miles de años. De seguir la velocidad actual, el IPCC prevé que ese mismo aumento del CO_2 tendrá lugar en siglos, no en milenios.

Un segundo reparo a la analogía es el elemento humano. La humanidad se está erigiendo en una fuerza de la naturaleza, como una pluma de magma o un meteorito venido del espacio, pero la variedad de perturbaciones que ejerce sobre el ambiente resulta insólita en la historia de la Tierra. Por esa razón creemos que los episodios de calentamiento extremo del pasado, como el del Pérmico, pueden ofrecernos información inequívoca sobre las consecuencias del calentamiento atmosférico. Si prestamos la debida atención, los fósiles y las rocas nos indicarán los resultados exclusivos de ese calentamiento, sin factores de confusión derivados de la actividad humana, como la afluencia de nutrientes procedentes de la agricultura, la desforestación por la tala o las extinciones causadas por la caza furtiva.

El mensaje que los episodios del pasado nos están transmitiendo cada vez con más claridad es el siguiente: es posible causar una extinción masiva simplemente liberando ingentes cantidades de gases de efecto invernadero. El resultado no variará porque el origen de los gases sea distinto, ya sean volcanes o centrales eléctricas de carbón o aeronaves. Y si sumamos a ello la multitud de factores alteradores que está provocando la humanidad, el pronóstico a largo plazo para la vida del planeta se presenta funesto.

No obstante, existe un tercer punto con el que nuestra especie rompería la analogía, uno mucho más halagüeño. A diferencia de las especies que sucumbieron a las extinciones masivas en el pasado, es posible impedir la pérdida de biodiversidad si ponemos en práctica con sensatez nuestros conocimientos y nuestra capacidad técnica. Un ejemplo: se pueden evitar las mareas tóxicas manteniendo limpios los cursos de agua y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

Cada vez se tienen menos dudas de que nos hallamos de pleno en la sexta extinción masiva. En este mundo en vías de calentamiento, las floraciones microbianas en las aguas continentales, los incendios forestales, el blanqueamiento del coral y los picos de la temperatura oceánica están ganando en frecuencia e intensidad. El lugar que este episodio de calentamiento acabe ocupando en la serie de las grandes extinciones dependerá, por primera vez en la historia de la Tierra, de una sola especie.


Chris Mays es profesor de paleontología en el Colegio Universitario de Cork. Investiga las extinciones masivas y las respuestas de la flora y la fauna polar a los episodios de calentamiento del pasado.


Vivi Vajda es geóloga en el Museo de Historia Natural de Suecia, especializada en microfósiles como el plancton o las algas. Estudia los cambios de la vegetación a lo largo del tiempo para conocer mejor las extinciones masivas.


Stephen McLoughlin es conservador de las colecciones de fósiles vegetales del Paleozoico y el Mesozoico del Museo de Historia Natural de Suecia. Sus intereses como investigador giran en torno a la evolución y la extinción de la flora.

EN NUESTRO ARCHIVO

La mayor extinción biológica conocida. Douglas H. Erwin en *IyC*, septiembre de 1996.

Impacto desde las profundidades. Peter D. Ward en *IyC*, diciembre de 2006.

Erupciones volcánicas y extinciones masivas. Howard Lee en *IyC*, agosto de 2016.

Los peores momentos de la Tierra. Peter Brannen en *IyC*, noviembre de 2020.



CIENCIA DE DATOS

LOS MACRODATOS TRANSFORMAN EL FÚTBOL

David Adam | Los clubes y las selecciones nacionales recurren cada vez más al análisis de datos y la inteligencia artificial a la hora de evaluar jugadores o diseñar tácticas

JACKIE NIAM/ISTOCK

El ceño fruncido de Cristiano Ronaldo saltó a los titulares este mes de octubre, cuando el astro portugués fue sustituido a falta de 18 minutos para el final de un partido entre el Manchester United y el Newcastle. Pero tal reacción no es exclusiva de Ronaldo: pocos futbolistas están de acuerdo cuando su entrenador decide mandarlos al banquillo y dar entrada a un suplente.

Durante la Copa del Mundo que se está celebrando en Catar, los jugadores tienen más argumentos para defender su presencia en el campo. Poco después del pitido final, los organizadores del torneo envían a cada jugador un desglose detallado de su actuación. Los delanteros pueden mostrar cuántos de sus desmarques fueron ignorados, y los defensas disponen de datos para evidenciar cómo hostigaron al equipo contrario cuando este tenía la posesión.

Es la última incursión de las cifras en el mundo del balompié. El análisis de datos ya ayuda a gestionarlo todo, desde los fichajes y la intensidad de los entrenamientos hasta la táctica que usar contra cada rival, ofreciendo incluso recomendaciones sobre la dirección en que conviene chutar desde cada punto del campo.

Mientras, los futbolistas se enfrentan a un escrutinio más propio de un astronauta. Los chalecos y bandas que llevan puestos pueden detectar el movimiento, seguir su posición mediante GPS y contar el número de disparos que realizan con cada pie. Las cámaras lo captan todo desde múltiples ángulos, como el tiempo que los jugadores mantienen la pelota o los balones aéreos ganados. Y para dar sentido a esta información, la mayoría de los equipos de élite emplean a analistas, entre los que hay matemáticos, científicos de datos y físicos procedentes de importantes empresas y centros de investigación, como Microsoft o el CERN, el laboratorio europeo de física de partículas.

A su vez, las ideas de esos analistas están cambiando la forma de jugar: los delanteros ya no disparan tanto de lejos, los extremos pasan a un compañero en vez de efectuar centros y los entrenadores se obsesionan con recuperar la posesión lo más cerca posible del área rival. Todos estos cambios tácticos se apoyan en pruebas sólidas que respaldan la intuición del entrenador.

«Los macrodatos han abierto una nueva era en el fútbol», asegura Daniel Memmert, científico deportivo de la Escuela Superior de Deportes de Alemania. «Han cambiado la filosofía y el comportamiento de los equipos, la forma de analizar a los rivales, y la manera de desarrollar el talento y ojear jugadores.»

EN SÍNTESIS

La ciencia de datos ya ayuda a gestionar muchos aspectos del mundo del fútbol, desde los fichajes o la intensidad de los entrenamientos hasta la táctica que conviene usar contra cada rival, y está modificando la forma de jugar.

Para interpretar la información captada por cámaras y dispositivos ponibles, la mayoría de equipos de élite emplean a analistas, entre los que hay matemáticos y físicos procedentes de grandes empresas y laboratorios.

La inteligencia artificial, que ya se usa para extraer datos de los vídeos de los partidos o en la modelización del juego sin balón, podría dar lugar a asistentes virtuales que ayuden al entrenador a tomar decisiones en tiempo real.

Estadísticas avanzadas

Uno de los ejemplos más famosos de la influencia de los datos en el deporte proviene de un juego distinto. En su libro *Moneyball*, Michael Lewis explica cómo Billy Beane, presidente del equipo estadounidense de béisbol Oakland Athletics, se basó en estadísticas avanzadas para construir, en 2002, un equipo ganador con un presupuesto reducido. Beane contrató a los jugadores a partir de datos detallados sobre su rendimiento, incluidos algunos previamente infravalorados, como la frecuencia con que un bateador llegaba a la base.

Beane tenía una ventaja con respecto a quienes tratan de imitarlo en el balompié. «El fútbol es mucho más complicado que el béisbol», explica Memmert. El béisbol es un juego con interrupciones constantes y donde, en cada momento, solo hay un equipo intentando sumar puntos. Además, las estadísticas del béisbol se habían recogido y estudiado con regularidad durante décadas. En cambio, el fútbol es un juego de «invasión» (donde se gana y se pierde terreno todo el tiempo), fluido y con tanteo bajo, y es mucho más difícil registrar quién hace qué y cómo afecta eso al resultado. Durante decenios, los analistas del fútbol se han centrado en los goles marcados y encajados, buscando una manera de modelizarlos para hacer predicciones.

Hoy en día se siguen usando variantes de ese método para pronosticar los resultados de los

partidos. Un modelo matemático que supone que los goles marcados y encajados se distribuyen en torno a un valor medio, desarrollado por epidemiólogos de la Universidad de Oxford, predijo correctamente que Italia ganaría a Inglaterra en la final de la Eurocopa de 2020. Y también acertó seis de los ocho cuartos de final.

Y esos buenos resultados no son flor de un día. Las predicciones estadísticas de los partidos son más precisas de lo que muchos se piensan, subraya Matthew Penn, estudiante de doctorado en Oxford que desarrolló el modelo de la Eurocopa de 2020. «El objetivo es asignar a cada equipo una valoración ofensiva y otra defensiva, obtenidas a partir del número total de goles que ha marcado cada equipo y de la dificultad relativa de sus rivales», detalla. «Al final, se obtiene un gran sistema de ecuaciones para hallar esos dos conjuntos de puntuaciones, y entonces resulta muy sencillo predecir cualquier resultado.» Para la Copa del Mundo de Catar, el modelo de Penn sugiere que Bélgica (que no figura entre los principales favoritos en las casas de apuestas) es el equipo con más opciones de llevarse el trofeo, seguida de Brasil.

¿De verdad funciona?

Lo que más les interesa a los entrenadores es la información sobre los lances del juego y cómo influyen en ellos los jugadores. Los analistas del fútbol llevan mucho tiempo registrando ese tipo de información. Uno de los que más éxitos cosechó fue Charles Reep, excontable de la Real Fuerza Aérea del Reino Unido que se pasó gran parte de la década de 1950 viendo partidos en Inglaterra y realizando observaciones básicas de factores como las posiciones en el campo y las secuencias de pases. Reep llegó a utilizar sus datos para analizar el rendimiento de los equipos y sugerir tácticas. En el club Wolverhampton Wanderers, ayudó a implantar un estilo de juego directo e incisivo que huía de los pases laterales y con el que ganaron tres campeonatos de liga en cinco años.

Las técnicas modernas facilitan sobremanera la obtención y el análisis de esas estadísticas, lo que ha llevado a casi todos los grandes clubes y a muchas selecciones nacionales a contar con analistas de datos desde hace más de un decenio. Y esa tendencia se extiende a las categorías inferiores: aparte de realizar su doctorado, Penn trabaja como analista a tiempo parcial para el Oxford City, un equipo de fútbol semiprofesional que compite en la National League South, una de las ligas que conforman la sexta división de Inglaterra.

Muchos analistas atribuyen una parte del reciente éxito del Brentford (club londinense que ascendió a la primera división inglesa hace dos temporadas, por primera vez en 74 años) a un algoritmo interno que califica a los jugadores de diversas ligas y ayuda al equipo a descubrir ta-

¿Quién ganará la Copa del Mundo?

Un modelo estadístico de «Poisson doble» que considera las virtudes ofensivas y defensivas de cada selección otorga a Bélgica la mayor probabilidad de ganar el Mundial de fútbol de Catar. Los resultados muestran algunas diferencias significativas respecto al *ranking* de la FIFA.

Modelo estadístico	Probabilidad de ganar (%)	*Ranking* de la FIFA
1. Bélgica	13,88	1. Brasil
2. Brasil	13,51	2. Bélgica
3. Francia	12,11	3. Argentina
4. Argentina	11,52	4. Francia
5. Países Bajos	9,65	5. Inglaterra
6. Alemania	7,24	6. Italia**
7. España	6,37	7. España
8. Suiza	5,29	8. Países Bajos
9. Portugal	3,78	9. Portugal
10. Uruguay	3,36	10. Dinamarca
11. Dinamarca	3,17	11. Alemania
12. Inglaterra	2,56	12. Croacia
13. Polonia*	2,33	13. México
14. Croacia	1,46	14. Uruguay
15. México	0,67	15. Suiza

* En el puesto 26 del *ranking* de la FIFA; ** No se clasificó para el Mundial.

lentos ocultos. El equipo de datos del Liverpool, donde hay físicos que trabajaron en el CERN y en la Universidad de Cambridge, ha desarrollado un modelo que evalúa si las acciones de un jugador sobre el terreno de juego aumentan las probabilidades de marcar un gol. Y científicos deportivos de la Universidad de Lisboa, en colaboración con el Fútbol Club Barcelona, publicaron el año pasado un análisis sobre las oportunidades de pase a lo largo de un partido, para distintos tipos de pases.

La inteligencia artificial permite recrear los movimientos de los jugadores que están fuera de plano en los partidos grabados

«Creo que lo más útil de todo lo que hacemos [en el Oxford City] son los informes previos al partido», opina Penn. «Analizamos las características de los jugadores del equipo contrario y elaboramos gráficos que muestran cómo suelen jugar y moverse. Y luego doy algunos consejos o sugiero cambios tácticos.» Antes de un partido reciente contra un equipo que estaba invicto, el análisis de Penn identificó que el lateral izquierdo tenía malas estadísticas en el juego aéreo. «Así que mi consejo fue situar a nuestro delantero más alto en la parte derecha del campo», señala. Y el Oxford ganó el partido. Ese es el tipo de información que puede obtener a simple vista un ojeador experimentado, pero, según Penn, «los datos siempre van a estar menos sesgados que la opinión de un especialista».

Los equipos no tienen que generar ellos mismos los datos brutos para ese tipo de análisis tácticos: pueden comprar la información a empresas privadas que examinan los vídeos de los partidos para registrar el resultado de unos 3000 lances del juego, como regates, pases y entradas. Al principio, esos datos se obtenían de forma manual, pero ahora se suele recurrir a la «visión artificial», un tipo de inteligencia artificial (IA). A menudo, los datos vienen acompañados de estadísticas descriptivas, como el porcentaje de pases completados por cada jugador.

Joanna Marks, que estudia un grado de matemáticas en la Universidad de Warwick y trabaja junto a Penn en el Oxford City, desarrolló a comienzos de este año un modelo que usaba esos datos brutos para evaluar la eficacia en el pase de todos los jugadores de la liga de Oxford. Ese es el tipo de análisis detallado que no suele estar disponible en los datos brutos suministrados por las empresas. «Hay que tener en cuenta el tipo de pase que intentan. No se puede considerar solo el porcentaje de pases completados con éxito, porque algunos son mucho más difíciles que otros», explica Marks. «El modelo ayuda a preparar los partidos, porque si uno descubre que el equipo rival pasa muy bien desde una zona del campo, entonces sabe a qué atenerse.»

Ravi Ramineni trabajó como analista de datos en Microsoft hasta 2012, cuando aceptó un puesto similar en los Seattle Sounders de Washington, su club local de la liga de fútbol estadounidense. Una de sus primeras tareas fue usar los datos de GPS sobre la distancia recorrida por los jugadores para optimizar sus sesiones de entrenamiento y preparación. «Recogiendo esos datos durante el entrenamiento, es posible saber si este ha sido demasiado intenso o demasiado suave, a fin de prevenir lesiones.» ¿Funcionó? «Tuvimos algunas temporadas muy buenas cuando aplicamos esos métodos. Pero no estoy seguro. Lo más difícil de cuantificar es si se ha logrado evitar una lesión.»

Esa incerteza plantea un problema a la hora de establecer el papel que desempeñan los datos en el éxito deportivo: no hay ningún experimento de control para comprobar la eficacia. Aun así, Ramineni destaca que los entrenadores de los Sounders se mostraron receptivos a sus análisis, tanto en los entrenamientos como al juzgar las virtudes de los jugadores. «Me dieron línea directa con los entrenadores, e incluso pude ir a hablar en persona con los jugadores», valora. «En otros equipos no ocurre eso. A veces el entrenador ni siquiera interactúa con el analista de datos.»

Asistentes virtuales

Los analistas cada vez prestan más atención al juego sin balón. «Algo que se escucha sin cesar en el análisis del fútbol es que necesitamos saber qué hace el jugador cuando no tiene la pelota», incide Ramineni.

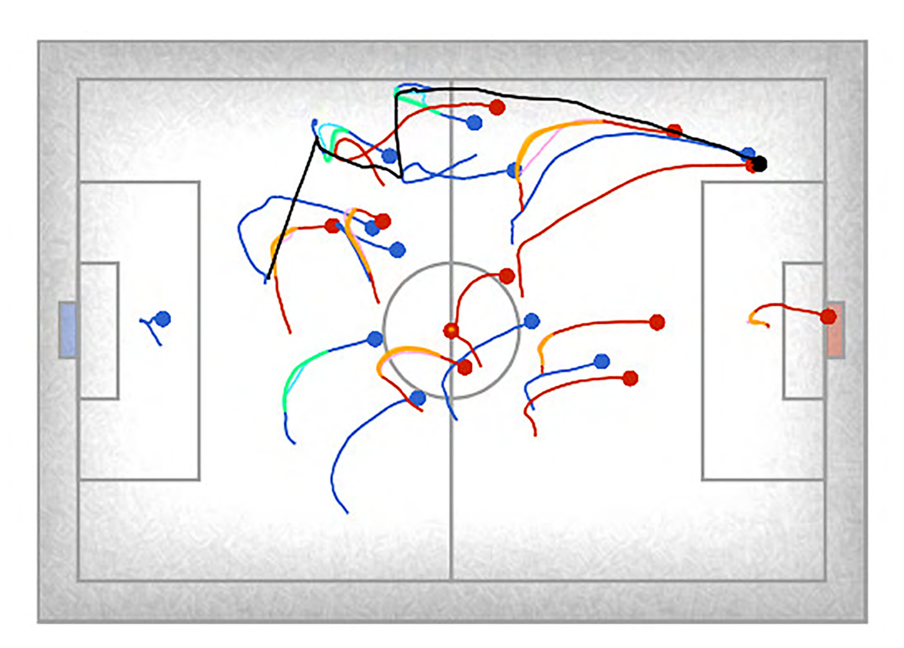
Eso es más difícil y caro, porque requiere cámaras específicas que no se limitan a seguir la

jugada principal, sino que vigilan a los jugadores que no participan de forma directa en ella y etiquetan su ubicación unas 25 veces por segundo. Las empresas que suministraban este tipo de datos solían firmar contratos de exclusividad con las ligas nacionales, revela Ramineni, lo que dificultaba el acceso a otros profesionales. «Si estabas ojeando a un jugador internacional de Sudamérica o Europa para la liga estadounidense, no podías consultar sus estadísticas sin balón», apunta.

En los últimos años ha surgido una técnica más potente que aprovecha la IA para predecir los movimientos de los jugadores en los encuentros grabados, incluso cuando no los enfocan las cámaras. Eso significa que las empresas de datos pueden usar las imágenes de televisión de los partidos (disponibles sin restricciones) para realizar análisis exhaustivos de los jugadores de cualquier parte del mundo, con y sin balón. Uno de esos modelos predictivos es fruto de un acuerdo entre investigadores de DeepMind (la división de IA de Google) y el equipo de datos del Liverpool. «Ese tipo de aplicación nos permite plantearnos cuestiones tácticas o situaciones ficticias», señala Ian Graham, director de investigación del Liverpool, que dejó un posdoctorado en física de polímeros en la Universidad de Cambridge para trabajar con las estadísticas del fútbol. «Para un lance concreto del partido, el modelo produce miles de simulaciones sobre otras cosas distintas que podrían haber pasado. Así, podemos juzgar la eficacia de una jugada de ataque en esa fase del encuentro».

Los departamentos de análisis de los clubes no suelen compartir detalles concretos sobre lo que hacen o hasta qué punto funciona, así que publicar ese trabajo resultó algo incómodo para el Liverpool, pero era un requisito para trabajar con DeepMind. «El Liverpool cuenta con uno de los departamentos de análisis más grandes y desarrollados del mundo del fútbol, y no tenemos ni de lejos los recursos necesarios para desarrollar esos modelos nosotros mismos», admite Graham. Eso, al menos, le da la tranquilidad de que ningún otro equipo es capaz de hacerlo.

Al igual que otros analistas de datos, Graham es reacio a atribuirse el mérito de los éxitos deportivos. «El fútbol presenta una gran variabilidad, así que los equipos a menudo pierden cuando no deberían perder y ganan cuando no deberían ganar», afirma. «En muchos sentidos, nuestro trabajo es más fácil cuando al equipo le va mal, porque el análisis suele mostrar que hemos jugado bien. Y si seguimos jugando así, esa



CAPTURA DE PANTALLA de una animación que compara los movimientos reales de los jugadores durante un partido de fútbol (*atacantes en azul, defensas en rojo*) con las predicciones de un modelo que calcula las trayectorias de los jugadores que no aparecen en las imágenes grabadas. El campo de visión de la cámara sigue el balón (*línea negra*). El modelo predice la posición de los atacantes (*verde*) y de los defensores (*naranja*) que están fuera del campo de visión, cuyas posiciones reales aparecen en cian y rosa, respectivamente.

FUENTE: «MULTIAGENT OFF-SCREEN BEHAVIOR PREDICTION IN FOOTBALL», SHAYEGAN OMIDSHAFIEI ET AL. EN *SCIENTIFIC REPORTS*, VOL. 12, ART. 8638, MAYO DE 2022 (CC BY 4.0)

temporada acabaremos ganando el número de partidos que esperábamos.»

Karl Tuyls, científico computacional de DeepMind, afirma que la modelización fuera del plano de la cámara es el primer paso hacia la creación de un asistente virtual basado en la IA que use datos en tiempo real para facilitar la toma de decisiones en el fútbol y otros deportes. «Cabe imaginar un sistema de IA que examine el rendimiento de la primera parte y sugiera un cambio táctico que podría dar mejores resultados», ilustra. Ese enfoque también podría ser útil en otros ámbitos, por ejemplo, para modelizar las trayectorias de los coches sin conductor y de los peatones en una calle muy concurrida de la ciudad, añade Tuyls.

Cambios en el juego

¿Cuál es el siguiente paso? Como cualquier científico, los expertos que analizan los datos del fútbol subrayan que hace falta investigar más. Sarah Rudd, ex científica de datos de Microsoft que dejó el Arsenal el año pasado, tras casi una década trabajando como analista del club londinense, envidia las ingentes cantidades de datos de telemetría que producen los coches de carreras, y que permiten a los ingenieros ajustar y mejorar su rendimiento. «Siempre miramos a la Fórmula 1 y decimos que sería increíble estar a ese nivel», comenta. «En el fútbol aún hay muchas cosas que no se miden, y otras que sí se miden pero no hemos averiguado cómo aprovechar.»

El próximo avance podría consistir en recabar información que refleje la orientación espacial de los jugadores, o incluso su forma de apoyarse. «Puede que los datos obtenidos no tengan aún el nivel de detalle que busca la gente», admite Rudd. «Todavía no captan esa pequeña finta o cambio de peso que hace un jugador para desequilibrar al defensa o engañar al portero.» El conocimiento incompleto de la posición de un jugador también puede suponer un problema, incluso para los análisis basados en la IA que realiza el Liverpool. «El modelo podría concluir que un jugador se equivocó porque debería haber empezado a correr en un punto y no lo hizo», señala Graham. «Pero quizá es que acababa de tropezar y estaba tirado en el suelo.»

¿Qué cambios en el juego ha provocado esta avalancha de datos que está experimentando el fútbol moderno? «Diría que la contratación de jugadores es el aspecto donde la inversión trae más cuenta», valora Ramineni. Aunque otra área importante es la de las jugadas de estrategia a balón parado, cuando un equipo saca una falta después de que el partido se detenga.

Existe un problema a la hora de medir el impacto de los datos en el éxito deportivo: no hay ningún experimento de control para comprobar la eficacia

Una conclusión clara que se extrae del análisis de datos es que los atacantes no deberían disparar desde lejos del área. «Si miras cualquier liga del mundo, la distancia desde la que tiran a puerta los jugadores era mucho mayor hace diez años», destaca Ramineni. «Eso ha ocurrido porque los analistas de datos empezaron a decir: "¿Por qué chutas desde ahí? ¡Solo hay un 2 por ciento de probabilidades [de marcar]!"». Muchos equipos también piden a sus jugadores que no intenten centros largos al área, añade, después de que las estadísticas mostraran que la mayoría no generaban peligro.

Y a medida que siga creciendo el volumen de datos generados, también lo harán las oportunidades de trabajo, concluye Ramineni. «Creo que los datos ya han dejado su huella en todos los aspectos del deporte, y no hay vuelta atrás.»

David Adam es periodista científico especializado en medioambiente, tecnología y medicina. Colabora con *Nature* y *The Guardian*.



Con la colaboración de nature

Artículo original publicado en *Nature*, traducido y adaptado por Investigación y Ciencia con el permiso de Nature Research Group© 2022.

EN NUESTRO ARCHIVO

Una sociedad dirigida por datos. Alex «Sandy» Pentland en *IyC*, enero de 2014.

LA SUMA DE LOS PRIMEROS NÚMEROS NATURALES (I)

Un sencillo problema de cálculo pone de manifiesto que algunas demostraciones matemáticas se limitan a probar un resultado, mientras que otras, además, lo explican

Bartolo Luque

En 1784, tras su séptimo cumpleaños, el pequeño Gauss ingresó en una escuela pública de educación primaria donde impartía las clases un profesor llamado Büttner [... y en la que] pasó dos años sin especiales incidencias. Para entonces ya había comenzado la clase de aritmética, donde la mayoría de los alumnos permanecía hasta los 15 años. Allí ocurrió un incidente que el propio Gauss, ya de anciano, solía relatar de buena gana. [...] El joven Gauss acababa de entrar en clase cuando Büttner les mandó que sumaran una serie aritmética. Apenas había acabado de dictar el enunciado, cuando Gauss lanzó su pizarra sobre la mesa con las palabras: [...] «Aquí está». Mientras el resto de los alumnos seguían contando, multiplicando y sumando, Büttner caminaba de un lado a otro con dignidad premeditada, lanzando ocasionalmente una mirada irónica y compasiva al más joven de sus alumnos. [...] Al final de la hora, el profesor volvió las pizarras hacia arriba. La del joven Gauss, con un solo número, era la primera. Cuando Büttner dio la respuesta, para sorpresa de todos los presentes, resultó que la del joven Gauss era correcta, mientras que muchas de las otras estaban mal.

Wolfgang Sartorius von Waltershausen
Gauss zum Gedächtnis (1856)



Carl Friedrich Gauss

WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

Este verano leí la deliciosa novela gráfica *El increíble viaje de Alexander von Humboldt al corazón de la naturaleza*, de Andrea Wulf y Lilian Melcher, que narra el épico viaje del polímata Alexander von Humboldt (1769-1859) a América del Sur y Centroamérica, al tiempo que nos acerca al pensamiento del padre de la geografía moderna y el ecologismo [*véase* «Von Humboldt: el científico universal», por José Manuel Sánchez Ron; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2019]. Como una cosa lleva a la otra, acabé disfrutando también de la irreverente película *Midiendo el mundo*, dirigida por Detlev Buck en 2012, cuyos protagonistas son ni más ni menos que Von Humboldt, el «nuevo Aristóteles», y Carl Friedrich Gauss (1777-1855), el príncipe de las matemáticas.

La película, que deviene una inesperada comedia, está basada en la exitosa novela alemana de 2005 *La medición del mundo*, escrita por Daniel Kehlmann. Tanto la novela como la película recrean una archiconocida anécdota sobre la temprana capacidad matemática de Gauss, según la cual, el maestro de su escuela pidió a los niños que sumaran los cien primeros números naturales para tenerlos entretenidos y callados un buen rato. Al parecer, Gauss obtuvo la respuesta,

$$1 + 2 + 3 + \cdots + 99 + 100 = 5050,$$

casi de inmediato, al percatarse de que

$$1 + 100 = 2 + 99 = 3 + 98 = \cdots = 101$$

y de que había $100/2 = 50$ de estos pares, por lo que bastaba con calcular

$$50 \times 101 = 5050.$$

El divulgador matemático Brian Hayes, interesado en la evolución y transmisión de este tipo de historias que conforman el imaginario de la ciencia y las matemáticas, se propuso determinar hasta qué punto era veraz la socorrida anécdota. Así que se tomó la molestia de recopilar hasta 109 versiones publicadas, y concluyó que todas ellas procedían de la misma fuente: una biografía de Gauss publicada el mismo año de su muerte por un colega de la Universidad de Gotinga, el geólogo Wolfgang Sartorius von Waltershausen. Se trata del texto que encabeza esta columna, que no hace mención a la suma de los cien primeros naturales ni al truco que empleó Gauss para resolver el problema. Según Hayes, la primera alusión a ese detalle «aritmético» aparece en una biografía de Gauss escrita por el matemático nazi Ludwig Bieberbach en 1938, unos ochenta años después de que Sartorius redactara sus memorias.

Hayes concluyó que no hay pruebas de que la anécdota ocurriera realmente. Pero, como dicen los italianos, *se non è vero, è ben trovato* (que podríamos traducir como «si no es verdad, está bien pensado»), y los profesores de matemáticas podemos seguir contando esta anécdota simplemente añadiendo el adjetivo «apócrifa».

Y ahora, como una cosa lleva a la otra, imaginemos por un momento que la historia es cierta y que el joven Gauss sumó los cien primeros números naturales en un instante, haciendo uso de un atajo. Empecemos con el que se suele explicar y veamos qué dificultades presenta para convertirse en una demostración, así como otras rutas alternativas que conducen al mismo resultado.

Casualidades matemáticas

La anécdota del joven Gauss se suele contar en clase al introducir el concepto de serie aritmética. La suma $T(n)$ de los primeros n números naturales,

$$T(n) = 1 + 2 + 3 + \cdots + n,$$

es un ejemplo de ese tipo de series.

Ya hemos visto el brillante razonamiento que habría empleado el joven Gauss para sumar los 100 primeros términos de esa serie. Haciendo lo mismo para un n general, vemos que la suma del primer y el último término de la secuencia vale $1 + n$, igual que la suma del segundo y el penúltimo, la del tercero y el antepenúltimo, y así sucesivamente:

$$\begin{aligned} 2 + (n-1) &= 1 + n, \\ 3 + (n-2) &= 1 + n, \\ &\cdots \end{aligned}$$

Podemos expresar esto mediante una especie de caligrama matemático, «doblando» la serie por la mitad y emparejando sumandos:

$$\begin{array}{rccccccccc} & 1 & + & 2 & + & \cdots & + & \frac{n}{2} & + \\ & n & + & (n-1) & + & \cdots & + & \left(\frac{n}{2}+1\right) & \\ \hline T(n) = & \underbrace{(1+n) + (1+n) + \cdots + (1+n)}_{n/2 \text{ veces}} \end{array}$$

De este modo, $T(n)$ se puede calcular como la suma de $n/2$ parejas, todas ellas con valor $(1+n)$:

$$T(n) = \frac{n}{2}(1+n) = \frac{n(n+1)}{2}\,.$$

Pero observemos que este razonamiento solo funciona para n par, en cuyo caso no queda ningún número sin emparejar y se obtienen exactamente $n/2$ parejas. La estrategia no habría funcionado tan bien si Gauss hubiera tenido que calcular la suma de los 101 primeros números, dado que el 51 habría quedado desparejado. En general, si n es impar, solo podemos formar $(n-1)/2$ parejas, y el número central de la secuencia, $(n-1)/2 + 1$, queda sin emparejar. El caligrama matemático en este caso sería:

$$\begin{array}{ccccccccc} 1 & + & 2 & + & \cdots & + & \frac{n-1}{2} & + & \\ & & & & & & & & \color{red}{\left(\frac{n-1}{2}+1\right)} + \\ n & + & (n-1) & + & \cdots & + & \frac{n+3}{2} & & \\ \hline \multicolumn{7}{c}{\underbrace{(1+n) + (1+n) + \cdots + (1+n)}_{(n-1)/2 \text{ veces}}} & + & \color{red}{\left(\frac{n-1}{2}+1\right)} \end{array}$$

Para n impar, la suma $T(n)$ se calcula como la contribución de las parejas más ese número «soltero» que hemos destacado en rojo:

$$T(n) = \frac{n-1}{2}(1+n) + \color{red}{\left(\frac{n-1}{2}+1\right)} = \frac{n(n+1)}{2}\,.$$

Sorprendentemente, ambos casos coinciden: la suma $T(n)$ resulta ser $n(n+1)/2$, con independencia de la paridad de n. El matemático Marc Lange se preguntaba si esto era una casualidad, una especie de milagro algebraico. Todas las verdades matemáticas son necesarias, así que podría parecer que en esta disciplina no hay lugar para las coincidencias genuinas. Sin embargo, como señala Philip Davis, que el decimotercer dígito de la representación decimal de π sea 9, el mismo que el decimotercer dígito de la representación decimal de e, a pesar de ser necesario, es una auténtica coincidencia matemática. ¿Ocurre lo mismo con nuestros dos resultados?

En su estudio sobre la anécdota, Hayes recoge otra manera en la que el joven Gauss pudo realizar el cálculo. Según algunos autores, Gauss habría sumado la serie consigo misma, pero con la segunda copia escrita en sentido inverso. Usando un caligrama matemático:

$$\begin{array}{rcccccccccc} & T(n) = & 1 & + & 2 & + \cdots + & (n-1) & + & n \\ + & & & & & & & & \\ & T(n) = & n & + & (n-1) & + \cdots + & 2 & + & 1 \\ \hline & 2T(n) = & \multicolumn{7}{c}{\underbrace{(1+n) + (1+n) + \cdots + (1+n) + (1+n)}_{n \text{ veces}}} \end{array}$$

Observemos que esta demostración nos conduce al mismo resultado,

$$2T(n) = n(1+n),$$

sin necesidad de considerar la paridad de n, lo que «revela» por qué la fórmula para n par e impar es la misma. Por tanto, no se trata de una mera coincidencia, ya que hemos encontrado una única explicación que da cuenta de ambos casos sin tener que distinguirlos. En cambio, cuando nos hallamos ante una coincidencia matemática genuina (como la del decimotercer dígito de π y e), no existe una explicación común y unificadora.

¿Le parece más elegante esta demostración que la anterior, en la que se trataban por separado los casos con n par e impar? No hay duda de que es más económica. Como decía Godfrey H. Hardy, «la "enumeración por casos" es una de las formas más aburridas de razonamiento matemático». Pero, además, sentimos que explica, porque apela a una simetría elemental: la serie creada al invertir el orden de los n términos de nuestra serie original es como una reflexión respecto a una recta. Una vez desvelada esta sencilla simetría, la demostración la explota de manera brillante: si sumamos ambas series término a término, obtendremos una serie de n términos constantes con valor $1 + n$.

Los caligramas y las pruebas visuales pueden ayudarnos a entender el problema y mostrarnos el camino hacia una demostración formal

Probar o explicar

La discusión anterior ilustra una sutil distinción entre las demostraciones matemáticas que sim-

plemente prueban que se cumple un teorema y aquellas que explican por qué se cumple. En la educación matemática tienden a usarse más las primeras, porque resultan más fáciles de enseñar como recetas o algoritmos. Por ejemplo, si ha visto alguna demostración más formal de nuestra fórmula, es probable que se basara en la inducción matemática:

(0) Para $n = 1$, la fórmula se cumple, puesto que $T(1) = 1$.

(1) Suponiendo que se cumple para $n = k$, comprobemos que se cumple para $n = k + 1$. En efecto:

$$T(k+1) = T(k) + (k+1)$$
$$= \frac{k(k+1)}{2} + k + 1 = \frac{(k+1)(k+2)}{2}.$$

Para que este argumento inductivo resultara explicativo, el hecho de que la fórmula de la suma sea válida para todos los números naturales tendría que explicarse, en parte, por el hecho de que funciona para $n = 1$. Sin embargo, podemos comenzar por $n = 42$ (comprobando antes que se cumple para $n = 1, 2, ..., 41$) y volver a utilizar el paso (1) de manera idéntica. Así pues, esta demostración por inducción matemática, aunque no exige distinguir entre n par e impar, no logra explicar el porqué de la fórmula, simplemente muestra que se cumple. Creo que la inducción no nos resulta explicativa porque necesita suponer lo que pretende demostrar: certifica que la expresión se satisface para todos los naturales sin arrojar luz sobre el motivo.

Sumatorios

¿Pueden considerarse demostraciones matemáticas rigurosas los caligramas que hemos expuesto? Seguramente casi todos los matemáticos dirían que no, y los físicos, que sí. Para formalizar nuestro último caligrama, en el que explotábamos la simetría lineal de la serie, los matemáticos emplean sumatorios. Con esos operadores, podemos escribir nuestra suma de una forma mucho más compacta:

$$T(n) = 1 + 2 + \cdots + (n-1) + n = \sum_{k=1}^{n} k.$$

Y, gracias a la conmutatividad de la suma, también podemos expresarla de manera «simétrica», igual que hicimos con el caligrama de Hayes:

$$T(n) = n + (n-1) + \cdots + 2 + 1 = \sum_{k=1}^{n} (n+1-k).$$

Si ahora sumamos ambas expresiones término a término, como se hace con los sumatorios, llegamos al mismo resultado que con el caligrama:

$$2T(n) = \sum_{k=1}^{n} k + \sum_{k=1}^{n} (n+1-k) = \sum_{k=1}^{n} \left(k + (n+1-k)\right)$$
$$= \sum_{k=1}^{n} (n+1) = (n+1)\sum_{k=1}^{n} 1 = n(n+1).$$

Con algo de práctica, es fácil interpretar este cálculo: al sumar nuestra serie con su «reflejada», resulta que las n sumas término a término valen siempre $(n+1)$. En realidad, hemos hecho exactamente lo mismo que en el caligrama, pero empleando el operador sumatorio, que está bien definido en matemáticas.

Pero, si el caligrama entra por los ojos y los sumatorios requieren cierto entrenamiento, ¿qué razones tenemos para aprender a manejarlos? Una es que, puesto que el operador sumatorio y sus propiedades matemáticas están definidos de manera rigurosa, tanto los humanos como las máquinas pueden certificar la prueba. Y otra, que una buena formalización, con algo de virtuosismo, genera simplicidad:

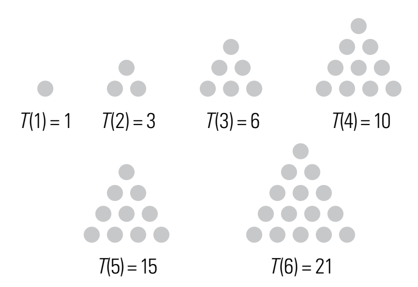
$$T(n) = \sum_{k=1}^{n} k = \sum_{k=1}^{n} (n+1-k)$$
$$= \sum_{k=1}^{n} (n+1) - \sum_{k=1}^{n} k = n(n+1) - T(n).$$

Sin duda, esta demostración es hermosa. ¿Le parece, además, explicativa? ¿Se le ocurre cómo transcribirla a un caligrama? Veamos cómo lo hicieron los antiguos matemáticos griegos.

Geometría y pruebas visuales

El uso de la letra T en la serie aritmética $T(n)$ que hemos usado para denotar la suma de los primeros n números naturales no es arbitrario. Los matemáticos de la antigua Grecia conocían esa fórmula y se referían a sus sucesivos valores como «números triangulares». Viendo la siguiente

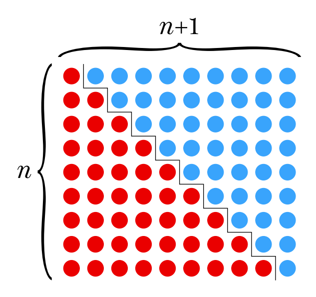
figura para los seis primeros números triangulares (1, 3, 6, 10, 15 y 21), el origen del apelativo resulta evidente:



Observemos que los sucesivos números triangulares pueden obtenerse formando triángulos equiláteros con un punto en la primera fila y un punto más en cada fila subsiguiente, de modo que cada uno de esos números $T(n)$ es la suma de los primeros n naturales:

$$T(1) = 1,$$
$$T(2) = 1 + 2 = 3,$$
$$T(3) = 1 + 2 + 3 = 6,$$
$$T(4) = 1 + 2 + 3 + 4 = 10,$$
$$T(5) = 1 + 2 + 3 + 4 + 5 = 15,$$
$$T(6) = 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 = 21.$$

¿Cómo demostraron los matemáticos griegos la fórmula general? Emplearon un razonamiento geométrico, como sugieren algunos autores que hizo el joven Gauss. Como vemos en la siguiente figura, la prueba consiste en formar un rectángulo con n y $n+1$ unidades de lado a partir de los triángulos (*rojo y azul*) asociados a dos números $T(n)$:



¿Resulta explicativa esta prueba visual? Está claro que lo es, ya que vuelve a apoyarse en una sencilla simetría de reflexión, en este caso respecto a la diagonal. Pero ¿es una demostración matemáticamente rigurosa? Notemos que se parece mucho al método clásico para calcular el área de un triángulo rectángulo, que consiste en reflejar el triángulo respecto a su hipotenusa para generar un rectángulo. Además, podemos trasladarla sin ambages al lenguaje formal de los sumatorios. El área del rectángulo es de $n(n+1)$ unidades, el resultado de sumar n filas de $(n+1)$ unidades cada una. En cada fila, esas unidades se pueden separar en dos grupos «simétricos» (el rojo y el azul). En el formalismo de los sumatorios, estamos diciendo que

$$n(n+1) = \sum_{k=1}^{n}(n+1) = \sum_{k=1}^{n} k + \sum_{k=1}^{n}(n+1-k) = 2T(n),$$

exactamente la misma demostración con sumatorios que nos inspiró el caligrama de Hayes y su simetría lineal. Pero, aunque se trate de los mismos símbolos y hagan referencia a la misma cuestión, la prueba visual nos permite interpretarlos de otra manera: como un área $n(n+1)$ que dividimos en dos trozos idénticos de área $T(n)$. Gracias a la prueba visual, logramos que la demostración formal nos explique el resultado, además de probarlo. ¿Se atrevería ahora a interpretar la última demostración «virtuosa» que hicimos con los sumatorios?

Ni los caligramas ni las pruebas visuales se consideran demostraciones rigurosas, pero espero haberlos convencido de que eso no significa que no tengan valor, ya que pueden ayudarnos a entender qué está sucediendo y mostrarnos el camino hacia una prueba formal. En la segunda parte de esta columna, veremos cómo el pequeño Gauss pudo resolver el problema de muchas otras maneras que nos conectan con áreas inesperadas de las matemáticas.

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



PARA SABER MÁS

Are there coincidences in mathematics? Philip J. Davis en *The American Mathematical Monthly*, vol. 88, págs. 311–320, mayo de 1981.

Proofs without words II: More exercises in visual thinking. Roger B. Nelsen. Mathematical Association of America, 2000.

Gauss's day of reckoning. Brian Hayes en *American Scientist*, vol. 94, págs. 200-205, mayo-junio de 2006.

What are mathematical coincidences (and why does it matter)? Marc Lange en *Mind*, vol. 119, págs. 307-340, abril de 2010.

La medición del mundo. Daniel Kehlmann. Maeva, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Gauss. Ian Stewart en *IyC*, septiembre de 1977.

¿Cuánto vale la suma de todos los números naturales? Bartolo Luque en *IyC*, octubre de 2020.

LA TECNOLOGÍA Y LA SOCIEDAD RETAN AL CUERPO HUMANO

¿Cuerpos inadecuados para el mundo moderno?



Guía del cazador recolector para el siglo xxi
Cómo adaptarnos a la vida moderna
Heather Heying y Bret Weinstein
Planeta, 2022

La tecnología permite ir más allá de las capacidades biológicas básicas. No podemos volar moviendo los brazos, pero sí en un avión o un parapente; aguantamos la respiración bajo el agua poco tiempo, pero un equipo de buceo o un submarino posibilitan escudriñar durante horas los fondos marinos. Más allá de la exploración del medio aéreo o marino, la tecnología reta al cuerpo humano desde nuestros orígenes.

Hay universales que no cambiarán en los próximos siglos: alimentación, sueño, sexualidad, lenguaje, cultura o relaciones sociales seguirán siendo temas fundamentales de estudio y reflexión. Sabedores de ello, los biólogos evolucionistas —y pareja— Heather Heying y Bret Weinstein han escrito a cuatro manos la *Guía del cazador recolector para el siglo xxi*. Heying y Weinstein defienden la clásica tesis del contraste existente entre el mundo moderno y el cuerpo de *Homo sapiens* que tenemos. Fruto de una anterior evolución lenta en comparación con las variaciones sociales y técnicas de los últimos siglos, nuestro organismo no mutará de forma tan rápida para adaptarse a esos cambios.

Heying y Weinstein han tenido la brillantez de encarar los enigmas sencillos de nuestra especie, las preguntas que cualquier niño haría, sabedores de que desde la ciencia todavía no podrán dar respuesta más que parcialmente a buena parte de esos misterios. Así irrumpen en la introducción con algunas de estas cuestiones: «¿Por qué reímos, lloramos o soñamos? ¿Por qué pasamos un duelo por nuestros muertos? ¿Por qué nos inventamos cuentos sobre gente que nunca ha existido? ¿Por qué cantamos, nos enamoramos o vamos a la guerra?».

Heying y Weinstein recurren desde el título a la dualidad simplificadora de los términos «cazador-recolector» para referirse a las últimas modificaciones notables del cuerpo de *H. sapiens*. Se permiten otras licencias divulgativas que pueden poner los pelos de punta a lectores expertos, pero este no es un libro para ellos, sino para el gran público. Así, al final de cada capítulo, los autores incluyen una sección de resumen («La lente correctora»), en la que dan consejos a los lectores para su vida cotidiana, sobre cada uno de los temas tratados, a la luz de las investigaciones que han ido pormenorizando. Es un formato que se está extendiendo, influido por la prolífica literatura de autoayuda y por las cada vez más sucintas píldoras audiovisuales que nos bombardean en las redes sociales, y en los canales de ciencia de Internet. Su éxito de ventas en EE.UU. les avala, aunque algunos lectores prefiramos pensar por nosotros mismos antes que sucumbir a resúmenes *powerpoint*, que quizá tienen todo el sentido para lectores más dispersos y pasivos, una mayoría en la era digital.

Los cazadores-recolectores que durante generaciones sobrevivieron en la naturaleza se

enfrentan ahora a entornos modificados, artificiales, en principio en aras de una supervivencia más fácil, al menos estadísticamente. Las consecuencias del desfase entre la fisiología del *sapiens* cazador recolector que habitamos y el mundo al que se enfrenta son poliédricas, pero, en general, conducen a trastornos y patologías que han aumentado su prevalencia en la sociedad moderna. Así, las poblaciones humanas viven horarios estrictos, confundiendo la medida del tiempo con su control, esclavizadas por la productividad laboral, carne de ansiedad, insomnio y estrés; el individualismo imperante tiende a alejarnos de la vieja socialización de la tribu, a reducir, simplificar y mercantilizar las relaciones humanas, desde la conversación al sexo, empujándonos a la depresión y al aislamiento; y, por último, el consumismo se erige como moderna respuesta compulsiva al impulso recolector, hiperestimulando los circuitos de recompensa que pueden arrastrarnos a las adicciones.

Si bien Heying y Weinstein huyen de la falacia naturalista (aquella que asume que lo que existe en la naturaleza es «lo que debería existir»), por momentos se ven sumidos en algunos conflictos ideológicos, propios de la cultura estadounidense contemporánea en la que, quieran o no, están inmersos. En su capítulo dedicado a la alimentación, por ejemplo, desaconsejan los transgénicos por el principio de precaución, aunque ellos mismos reconocen: «Los transgénicos en sí mismos no son peligrosos ni seguros. Pero se apartan de la selección artificial que los agricultores llevan miles de años practicando»; establecen así una distinción entre la selección genética tradicional en la agricultura (que se practica desde el neolítico) y las modificaciones que se pueden realizar con las técnicas actuales de edición genética. [Para evitar confusiones y pánicos innecesarios, recomiendo acudir a *Transgénicos sin miedo* (Destino, 2017) de José Miguel Mulet.] El sesgo ideológico es aún más notable en el capítulo dedicado al sexo y al género, donde se aconseja, literalmente: «A las mujeres heterosexuales: no sucumbáis a la presión social por acceder fácilmente a mantener relaciones sexuales». ¿Y las lesbianas sí? ¿Y los hombres? En fin.

Debo reconocer que uno se siente tentado a abandonar la lectura ante tales dislates, impropios del ensayo científico. Sin embargo, seguí con ella por el interés personal que me despertaban los siguientes capítulos, dedicados a la paternidad y las relaciones personales, la infancia, la escuela y el paso a la edad adulta (¿adolescencia?). Recomiendo su lectura crítica, huyendo de la propia cámara de resonancia, a padres y docentes, pues, siendo sabedores del contexto cultural e ideológico de los autores, se pueden extraer valiosos consejos y valoraciones e, incluso, perspectivas de futuro de la deriva de nuestra sociedad, cada vez más bajo el influjo estadounidense.

Sobre la infancia y la educación, resulta interesante el enfoque dialógico que Heying y Weinstein esbozan sobre algunas dicotomías: colaboración o competividad, fragilidad o «antifragilidad» (evitan «dureza»), padres helicóptero o padres quitanieves, control o riesgo. Presentan la escuela como un elemento social novedoso en nuestra historia evolutiva, más que la agricultura o la escritura. La escolarización forzosa y la docencia son rarezas de la historia humana. Sorprende que, desde una perspectiva inicial alejada de la pedagogía, se llegue igualmente a una cuestión crucial: ¿qué se debe enseñar necesariamente en la escuela y qué no? Como bien ha condensado otro biólogo, Juan Fernández, en *Educar en la complejidad* (Plataforma, 2022), la complejidad social y del fenómeno educativo se traduce en nuestra interpretación de lo que debe ser la escuela: se deberían tomar decisiones políticas desde la ciencia educativa y acciones pedagógicas en el aula fundamentadas en la investigación, considerando, ineludiblemente, la biología humana.

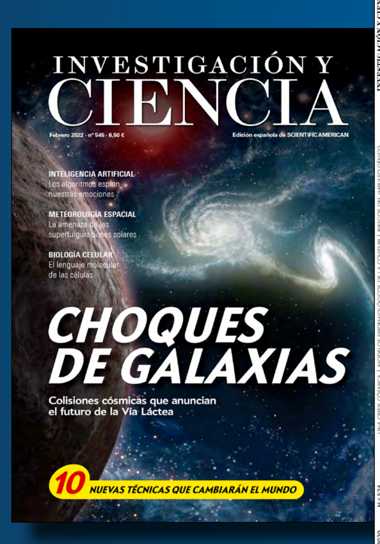
«El paso a la edad adulta» no es un capítulo para adolescentes. Es un oráculo para mayores de edad, que no adultos, que viven abotargados en un mundo que ya no es el de los cazadores recolectores, ni el del siglo XX. Es el preámbulo imprescindible para comprender la debacle homogeneizadora de las culturas del mundo, el sinsentido del imposible crecimiento económico continuo y la necesidad del salto que, a escala planetaria, se debe llevar a cabo para evitar el colapso de la civilización tal y como la hemos conocido, y concebido.

Nuestros cuerpos inadecuados, o el transhumano futuro que habita en nosotros, parafraseando al filósofo Antonio Diéguez, están agazapados esperando un cambio que no llega, ni en nuestro comportamiento *sapiens* ni en el frágil exterior que modificamos –cuando no destruimos– a nuestro antojo.

Antoni Hernández-Fernández
Universidad Politécnica de Cataluña

Accede a la HEMEROTECA DIGITAL

DE TODAS NUESTRAS PUBLICACIONES







Suscríbete y accede a todos nuestros artículos

ARCHIVO

Encuentra toda la información sobre el desarrollo de la ciencia y la tecnología durante los últimos 45 años

DIGITAL

Accede desde cualquier ordenador o tableta a más de 20.000 artículos elaborados por expertos

www.investigacionyciencia.es



Prensa Científica, S.A.